

**Beitrag zur Entwicklung eines Konstruktionssystems
für den rechnerischen Festigkeitsnachweis
von punktförmig, mechanisch gefügten Bauteilen**

eingereicht als:

Diplomarbeit

an der Hochschule Mittweida/Rosswein
im Fachgebiet Fügetechnik
am Lehrstuhl für Maschinenbau und Feinwerktechnik

Studiengang: Stahl- und Metallbau

1. Prüfer/Gutachter:
2. Prüfer/Gutachter:
Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner
PD Dr.-Ing. habil. Frank Riedel
Dipl.-Ing. Roman Marx

vorgelegt von:

Johannes Görler
Heidestraße 11
01471 Großdittmannsdorf

Abgabetermin:

04. Januar 2010

Danksagung

Diese Arbeit ist am Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Umformtechnik (IWU) in Dresden entstanden.

Ganz herzlich möchte ich meinem Betreuer Dipl.-Ing. Roman Marx bedanken, der mir immer hilfreich bei Fragen oder Diskussionen zu meiner Diplomarbeit zur Seite stand.

Danken möchte ich auch Dr.-Ing. habil. Frank Riedel am IWU in Chemnitz für seine Geduld und die motivierenden Anregungen zu meiner Diplomarbeit. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Darüber hinaus gebührt Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner Dank für seine geduldigen aber stets kritischen und kreativen Hinweise.

Danken möchte ich natürlich auch meinen Eltern, die zum großen Teil mein Studium finanziert haben und mich dabei zu jeder Zeit unterstützt haben.

Außerdem möchte ich mich bei allen Anderen bedanken, die mich bei meiner Diplomarbeit unterstützt haben, sowohl den netten Kollegen am Fraunhofer IWU, als auch Freunden die bereit waren Korrektur zu lesen oder mich mit wichtiger Literatur unterstützt haben. Besonders möchte ich meinem Freund, Dipl.-Ing. André Warschofsky danken, ohne dessen detailreiche Anregungen diese Arbeit von mir nicht so hätte fertig gestellt werden können.

Januar, 2010

Johannes Görler

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungen, Einheiten und Formelzeichen	X
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Grundlagen.....	3
2.2 Berechnungsmethoden punktförmig gefügter Verbindungen.....	6
2.2.1 Stahlbau DIN 18800	6
2.2.2 Punktförmig gefügte Verbindungen	7
2.2.3 Lösungsansatz für punktförmige Fügenähte	8
3 Theoretische Betrachtung.....	10
3.1 Vorbetrachtung	10
3.1.1 Problemstellung.....	10
3.1.2 Geplanter Lösungsweg.....	10
3.1.3 Vermutung/Hypothese.....	12
3.1.4 Untersuchungsumfang.....	12
Beschreibung der Randbedingungen zur Untersuchung für punktförmige Fügenähte.....	12
Beanspruchungsrichtungen	13
3.2 Ergebnisgrößen / Herleitungen	14
3.2.1 Höchstzugkraft	14
3.2.2 Grenznahtfestigkeit.....	15
3.2.3 Grenznahtfestigkeit, bezogen auf Clinchverbindungen	16
3.2.4 Normiert Grenznahtfestigkeitskurve.....	17
4 Experimentelles Vorgehen.....	20
4.1 Probenherstellung.....	20
4.1.1 Angaben zum Werkstoff / Kennwerte.....	20
4.1.2 Probengeometrie	20
4.1.3 Zuschnitt.....	23
4.2 Fügen 23	
4.3 Ermitteln der Fügeparameter der TOX-Werkzeuge	26
4.4 Festigkeitsprüfung - Zugversuch	32
5 Versuchsergebnisse	34
5.1 Ergebnisse aus dem Zugversuch.....	34
5.2 Versagen / Bruchbilder	37
6 Versuchsauswertungen	40
6.1 Auswertung hinsichtlich der Höchstzugkraft	40
6.1.1 Analyse eines Messpunktes	40
6.1.2 Abhängigkeit der Höchstzugkraft von der Blechdicke	41
6.1.3 Abhängigkeit der Höchstzugkraft vom Blechdickenverhältnis	42
6.1.4 Zusammenhang zwischen Höchstzugkraft und Verformung	45
6.1.5 Abhängigkeit der Höchstzugkraft von der Beanspruchungsrichtung	47

6.1.6	Abhängigkeit der Höchstzugkraft von der Mittigkeit der Clinchverbindungen im Überlappungsbereich unter Scherzugbeanspruchung	48
6.2	Auswertung hinsichtlich der Grenznahtfestigkeit	51
6.2.1	Herleitung der Grenznahtfestigkeit	51
6.2.2	Abhängigkeit der Grenznahtfestigkeit von der Blechdicke	53
6.2.3	Abhängigkeit der Grenznahtfestigkeit von der Beanspruchungsrichtung	55
6.3	Analyse der Festigkeitseigenschaftsfelder	57
	Versuchsreihe 1,5/1,5:.....	57
	Versuchsreihe 0,75/0,75:.....	58
	Versuchsreihe 1,5/0,75:.....	62
	Versuchsreihe 0,75/1,5:.....	64
	Versuchsreihe 2,5/2,5:.....	65
	Versuchsreihe 1,25/2,5:.....	67
6.4	Auswertung des analytischen Berechnungsansatzes.....	69
7	Zusammenfassung und Ausblick	79
	Literaturverzeichnis	82
	Weiterführende Literatur.....	82
	Anhang.....	84

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1 :	Einordnung der Fügeverfahren nach DIN 8593-0, Quelle: [Norm-51].....	3
Abb. 2.2:	Schema TOX-Werkzeuge und Werkstück; Quelle: [TOX-03].....	4
Abb. 2.3:	Clinchen mit starrer Matritze, z. B. TOX®; Quelle: [MEN-04]	4
Abb. 2.4:	Clinchen mit geteilter Matritze; Quelle: [MEN-04]	5
Abb. 2.5:	Matrizenloses Clinchen	5
Abb. 2.6:	Schematische Darstellung der Eigenschaftsbereiche für punktförmig gefügte Bauteile; Quelle: [S61-08]	9
Abb. 2.7:	Spannungsverteilung einer punktförmig, mechanisch gefügten Verbindungsnaht; Quelle: [S61-08]	9
Abb. 3.1:	Darstellung der Höchstzugkraft über Gesamtprobenbreite der Versuchsreihe 1,5/1,5; Scherzug für n=2	13
Abb. 3.2:	Skizze der Beanspruchungsrichtungen	14
Abb. 3.3:	Kraft-Weg-Verlauf eines Scherzugversuches, Versuchsreihe 1,5/1,5.....	15
Abb. 3.4:	Transformation von Höchstzugkräften zu Spannungen; Quelle: [MRL-06]	15
Abb. 3.5:	Darstellung der experimentell ermittelten Grenznahtkurve, $\alpha < 1,0$, unter Schälzugbeanspruchung, Versuchsreihe 1,5/1,5	17
Abb. 3.6:	Grenznahtkurven der Reihe 1,5/1,5, real und normiert.....	19
Abb. 4.1:	Skizzen der Probenbleche; links: Scherzug, rechts: Schälzug	21
Abb. 4.2:	gefügte Scherzugprobe der Versuchsreihe 1,5/1,5; e = 45, n = 4.....	21
Abb. 4.3:	links: 45°-Probenhalter/Spannbacken mit Probenblech und Querkraftaufnehmer im eingebauten Zustand; rechts: Probengeometrie 45°-Schrägzugprobe	22
Abb. 4.4:	Werkzeuge (Stempel und Matritze) TOX®	23
Abb. 4.5:	Promess-320 mit Fügevorrichtung, beim Fügevorgang	24
Abb. 4.6:	Gefügte 4 Punkt Schälzugprobe, Versuchsreihe 1,5/1,5, e = 45; n = 4.....	25
Abb. 4.7:	Spannbacken für Schälzugproben; links: in Standard-Schraubstock unter Balance-Pressen; rechts: in Spezial-Halterung für dicke Bleche mit hydraulischer Presse.....	25
Abb. 4.8:	4-Punkt Schälzugprobe, gefügt und aufgebogen, Versuchsreihe 1,5/1,5, e = 30; n = 4	26
Abb. 4.9:	STRUERS Discotom-5: wassergekühlter Trennschleifer; U/min: 2850.....	27
Abb. 4.10:	Links: STRUERS ProntoPress-10: Warmeinbetten in transparenten Kunststoff in 40mm Formen; Rechts: eingebettete Clinchprobe	28
Abb. 4.11:	STRUERS RotoPol-22/RotoForce-4: wassergekühlte Schleif-/Poliermaschine mit 2 Arbeitstellern (rechts schleifen, links polieren)	29
Abb. 4.12:	Arbeitsplatz Mikroskopie	30
Abb. 4.13:	Vermessene Probe der Versuchsreihe 1,5/0,75.....	30
Abb. 4.14:	Höchstzugkraft und Hinterschnitt abhängig der Fügekraft, für Versuchsreihe 1,5/1,5	31
Abb. 4.15:	Höchstzugkräfte für verschiedene Fügekräfte der Versuchsreihe 1,5/1,5	31

Abb. 4.16:	Links: Arbeitsplatz Zugprüfmaschine; Rechts: Standard-Zugprüfmaschine Inspekt 50 desk, Hegewald & Peschke	32
Abb. 4.17:	Links: untere, hydraulische Spannbacken mit Adapterspannbacke; Rechts: große Adapterspannbacken, eingebaut mit 4-Punkt Zugprobe	33
Abb. 4.18:	Höchstzugkräfte über Probenbreite für Versuchsreihe 1,5/1,5	33
Abb. 5.1:	Höchstzugkräfte mit Standardabweichung unter Scherzugbeanspruchung für Versuchsreihe 1,5/1,5	35
Abb. 5.2:	Höchstzugkräfte für verschiedene Punktabstände unter Scherzugbeanspruchung für Versuchsreihe 0,75/0,75; 1,5/1,5; 2,5/2,5.....	36
Abb. 5.3:	Höchstzugkräfte mit Standardabweichung unter Schälzugbeanspruchung, für Versuchsreihe 1,5/1,5	37
Abb. 5.4:	Höchstzugkräfte für verschiedene Punktabstände unter Schälzugbeanspruchung für Versuchsreihe 0,75/0,75; 1,5/1,5; 2,5/2,5.....	37
Abb. 5.5:	Kraft-Weg-Verlauf eines Scherzugversuchs der Versuchsreihe 1,5/1,5.....	38
Abb. 5.6:	Versagen einer Scherzugprobe mit kombiniertem Versagensbild (starke Verformung des Fügepunktes → leichter Anriss → anschließend Ausknöpfen); Einpunktprobe Versuchsreihe 1,5/1,5	38
Abb. 5.7:	Kraft-Weg-Kurve einer Schälzugbeanspruchung der Versuchsreihe 1,5/1,5.....	39
Abb. 5.8:	Versagen(Ausknöpfen) unter Schälzugbeanspruchung einer Dreipunktprobe, Versuchsreihe 1,5/1,5	39
Abb. 6.1:	Höchstzugkraft abhängig der Verbindungsanzahl unter Scherzugbeanspruchung der Versuchsreihen 0,75/0,75; 1,5/1,5; 2,5/2,5.....	41
Abb. 6.2:	Höchstzugkraft abhängig der Verbindungsanzahl unter Schälzugbeanspruchung der Versuchsreihen 0,75/0,75; 1,5/1,5; 2,5/2,5.....	42
Abb. 6.3:	Höchstzugkraft (je Verbindungspunkt) abhängig vom Blechdickenverhältnis unter Scherzugbeanspruchung der Versuchsreihe 0,75/1,5; 0,75/0,75; 1,5/0,75.....	44
Abb. 6.4:	Höchstzugkraft (je Verbindungspunkt) abhängig vom Blechdickenverhältnis unter Schälzugbeanspruchung der Versuchsreihe 0,75/1,5; 0,75/0,75; 1,5/0,75.....	44
Abb. 6.5:	Messdaten des Messpunktes Reihe 1,5/0,75, n = 3, e = 20; b = 60.....	45
Abb. 6.6:	Zugproben eines Messpunktes; n=3; e=20; b=60, Versuchsreihe 1,5/0,75	45
Abb. 6.7:	Höchstzugkraft abhängig von der Beanspruchungsrichtung.....	48
Abb. 6.8:	Zugprobenbilder - Links: mittig gesetzte Fügepunkte; Rechts: außermittig gesetzte Fügepunkte	49
Abb. 6.9:	Höchstzugkräfte der mittig gefügten Probenbleche, Testreihe TIR.....	50
Abb. 6.10:	Höchstzugkräfte der außermittig gefügten Probenbleche, Testreihe TAR.....	50
Abb. 6.11:	Höchstzugkräfte von Clinchverbindungen in Abhängigkeit der Probenbreite für unterschiedliche Verbindungsanzahlen und Punktabstände einer Versuchsreihe.....	52

Abb. 6.12:	Grenznahtkurve mit Standardabweichung(rot) für die Versuchsreihe 1,5/1,5	53
Abb. 6.13:	Grenznahtfunktionen real und normiert für Versuchsreihen 0,75/0,75; 1,5/1,5; 2,5/2,5 unter Scherzugbeanspruchung	54
Abb. 6.14:	vernetzte Grenznahtfunktionen als 3D-Modell der Versuchsreihen 0,75/0,75; 1,5/1,5; 2,5/2,5 unter Scherzugbeanspruchung	55
Abb. 6.15:	Grenznahtfunktionen der Versuchsreihe 1,5/1,5 für Beanspruchungsrichtungen 0°, 45°, 90°	56
Abb. 6.16:	Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 1,5/1,5 unter Scherzugbeanspruchung	58
Abb. 6.17:	Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 1,5/1,5 unter Schälzugbeanspruchung	58
Abb. 6.18:	Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 0,75/0,75 unter Scherzugbeanspruchung	59
Abb. 6.19:	Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 0,75/0,75 unter Schälzugbeanspruchung	60
Abb. 6.20:	Zugproben Versuchsreihe 0,75/0,75; oben: e=20mm, n=3, Überlappungsbereich aufgebogen bis zu den Fügepunkten; unten: e=45mm, n=2, Probe kaum verbogen	61
Abb. 6.21:	Schadensbild der Zugproben, stempelseitiges Blech; Links: e=20mm, n=3, Riefen gut erkennbar; Rechts: e=45mm, n=2, Ausknöpfen ohne Schaden; Mitte: direkter Vergleich der beiden Zugproben	61
Abb. 6.22:	Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 1,5/0,75 unter Scherzugbeanspruchung	62
Abb. 6.23:	Zugproben Versuchsreihe 1,5/0,75; Oben: e=16mm, n = 4, Überlappungsbereich aufgebogen bis zu den Fügepunkten; Unten: e = 45mm, n = 2, Probe kaum verbogen	63
Abb. 6.24:	Schadensbild der Zugproben, stempelseitiges Blech; Links: e = 16mm, n = 3, Riefen gut erkennbar; Rechts: e = 45mm, n = 2, Ausknöpfen mit wenig Verformung	63
Abb. 6.25:	Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 1,5/0,75 unter Schälzugbeanspruchung	63
Abb. 6.26:	Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 0,75/1,5 unter Scherzugbeanspruchung	64
Abb. 6.27:	Säulendiagramm für die Höchstzugkräfte der Versuchsreihe 1,5/0,75 mit Standardabweichung unter Scherzugbeanspruchung	64
Abb. 6.28:	Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 0,75/1,5 unter Schälzugbeanspruchung	65
Abb. 6.29:	Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 2,5/2,5 unter Scherzugbeanspruchung	66
Abb. 6.30:	Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 2,5/2,5 unter Schälzugbeanspruchung	66
Abb. 6.31:	Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 1,25/2,5 unter Scherzugbeanspruchung	67
Abb. 6.32:	Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 1,25/2,5 unter Schälzugbeanspruchung	68
Abb. 6.33:	Qualitative Darstellung m_{\max}	70

Abb. 6.34:	Korrekturwert delta-m für Diagramme der Referenzfunktion mit Anstieg + delta m	72
Abb. 6.35:	Referenzfunktion 0,75/0,75, normal	73
Abb. 6.36:	Referenzfunktion 0,75/0,75, erhöhter Anstieg	73
Abb. 6.37:	Referenzfunktion 0,75/0,75, 2-Punkt basiert	73
Abb. 6.38:	Referenzfunktion 1,5/1,5	74
Abb. 6.39:	Referenzfunktion 1,5/1,5, erhöhter Anstieg	74
Abb. 6.40:	Referenzfunktion 1,5/1,5, 2-Punkt basiert	74
Abb. 6.41:	Referenzfunktion 2,5/2,5	75
Abb. 6.42:	Referenzfunktion 2,5/2,5 , erhöhter Anstieg	75
Abb. 6.43:	Referenzfunktion 2,5/2,5 , 2-Punkt basiert	75
Abb. 6.44:	Erwartungswerte der Höchstzugkräfte (reale Messwerte – Referenzfunktionen), Versuchsreihe 0,75/0,75.....	76
Abb. 6.45:	Erwartungswerte der Höchstzugkräfte (reale Messwerte – Referenzfunktionen), Versuchsreihe 1,5/1,5	77
Abb. 6.46:	Erwartungswerte der Höchstzugkräfte (reale Messwerte – Referenzfunktionen), Versuchsreihe 2,5/2,5	78

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1:	Übersicht experimentelle Randbedingungen.....	11
Tab. 3.2:	Gesamtprobenbreite für unterschiedliche Punktzahlen	11
Tab. 3.3:	Probenzuschnitte jeweils für Scher-/ Schälzug.....	11
Tab. 3.4:	Tabelle der Werte für die normierte Grenznahtkurve.....	19
Tab. 4.1:	Clinch-Werkzeugempfehlung der Fa. TOX®	26
Tab. 4.2:	Reihenfolge der metallographischen Behandlung	28
Tab. 5.1:	Ergebnistabelle der Höchstzugwerte unter Scherzugbeanspruchung der Versuchsreihe 1,5/1,5.....	34
Tab. 6.1:	Beispiel einer Nahtfaktorentabelle.....	43
Tab. 6.2:	Tabelle der Höchstzugkräfte für Beanspruchungsrichtungen 0°, 45°, 90° und e = 20mm	47
Tab. 6.3:	Höchstzugwerte der Testreihen TIR/TAR.....	51

Abkürzungen, Einheiten und Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	mm ²	Fläche
a		Auslastungsgrad (Materialauslastung)
α	K ⁻¹	Wärmedehnzahl
b	mm	Gesamtbreite des Probebleches
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
d _M	mm	Innendurchmesser Matrize
E	MPa	Elastizitätsmodul
e	mm	Punktabstand der Clinchverbindungen
F _F	kN	Fügekraft
F _H	N	Höchstzugkraft
F _{H,mittel}	N	Höchstzugkraft, gemittelt
G	MPa	Schubmodul
GW	-	Grundwerkstoff
Ha	mm	Halsdicke
Hi	mm	Hinterschnitt
K	-	Koeffizient (für Grenznahtkurven)
l _i	mm	Zuschnittlänge
l _f	mm	Freie Einspannlänge
l _Ü	mm	Überlappungslänge der Probenbleche
n	-	Anzahl der Clinchverbindungen
OF	-	Oberfläche
r	mm	Innenbiegeradius
R _m	MPa	Mindestzugfestigkeit
R _{m, N}	MPa	Zugfestigkeit der Punktnaht
T	°C	Temperatur
t _B	mm	Bodendicke Clinchverbindung
t ₁	mm	Oberblechdicke/Blech 1
t ₂	mm	Unerblechdicke/Blech 2
v = e/2	mm	Randabstand der Clinchverbindung
γ	g/cm ³	spez. Gewicht
μ	-	Querdehnzahl

1 Einleitung

Punktförmig, mechanisch gefügte Verbindungen wurden schon zur Bronzezeit hergestellt und sind im Allgemeinen in Form von Nietverbindung bekannt. Sie waren damals fast die einzige Methode zur kraft- und formschlüssigen Verbindung für Bleche und vor allem Schmiedeteile. Auch heutzutage haben mechanisch gefügte Verbindungen eine wichtige industrielle Bedeutung. Speziell beim Clinchen können die Verbindungen sehr einfach und gut reproduzierbar hergestellt werden. Clinchverbindungen sind in einigen industriellen Bereichen den Widerstandspunktschweißverbindungen aus wirtschaftlichen und technologischen Gründen überlegen und haben diese bereits abgelöst. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit sind optimierte Berechnungsmethoden allerdings genauso wichtig wie das Verfahren selbst. Derzeitige Berechnungsansätze beziehen sich aber nur auf experimentell ermittelte Höchstzugkräfte von 1-Punkt Proben. Daher besteht die Notwendigkeit nach einer einfachen und effizienten Berechnungsvorschrift.

Ein von PD Dr.-Ing. habil. Frank Riedel am Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Umformtechnik(IWU) entwickelter Ansatz besteht darin, der gesamten Fügenaht kontinuierliche Eigenschaften einzubeschreiben, um somit eine analytische Berechnung auf Basis von Spannungen zu ermöglichen. Aus diesem Anlass wurde am Fraunhofer IWU ein Konstruktionssystem für Punktnähte auf der Basis von Spannungen entwickelt. "Unter einem Konstruktionssystem wird ein durch den Konstrukteur einfach anwendbares Konstruktionshilfsmittel für den Entwurf und die Bemessung mechanisch gefügter Bauteile in Form einer Richtlinie verstanden. Das Konstruktionssystem beinhaltet eine Zusammenstellung von Festigkeitseigenschaften punktförmiger Verbindungen in Form von Grenznahtfestigkeiten, einschließlich Empfehlungen für die Wahl von Sicherheitsbeiwerten." [S61-08] Die Ergebnisse dieser Arbeit stellen einen Beitrag dazu dar und sollen in das Konstruktionssystem übernommen werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine allgemeine, analytische Berechnungsgrundlage für die Auslegung von geclinchten Punktnähten bei vorgegebener Spannung zu finden. Als Berechnungsgrundlage wird eine beschreibende Funktion für sog. Grenznahtfestigkeitskurven gesucht. Nach der Analyse des Standes der Technik sollen mithilfe verschiedener Beanspruchungsrichtungen Höchstzugwerte unter Scher-, Schäl- und 45°-Schrägzug ermittelt werden. Es sollen systematische Untersuchungen für unterschiedliche Blechdicken, Punktabstände und Punktzahlen unter Einbindung von Messtechnik an den entwickelten Probengeometrien durchgeführt werden. Die dadurch gewonnenen Messwerte sollen unter Ableitung von Gesetzmäßigkeiten und Eigenschaftsbestimmung der Verbindungen grafisch und wenn möglich analytisch ausgewertet werden.

Im Abschnitt 2 werden Grundlagen zum Clinchen erläutert und der Stand der Technik sowie bekannte Berechnungsgrundlagen dargestellt. Im 3. Abschnitt wird der geplante Lösungsweg beschrieben, zudem werden Ergebnisgrößen definiert. Im 4. Abschnitt werden das experimentelle Vorgehen und der Ablauf zur Erstellung der Zugproben erläutert. Zudem wird die Prüfmethode erklärt und die Optimierung der Fügeparameter beschrieben. Im 5. Abschnitt werden die Ergebnisse der Zugversuche dargestellt. Es wird auf verschiedene Versagensbilder eingegangen. Im 6. Abschnitt werden die experimentellen Ergebnisse der Zugversuche hinsichtlich der Abhängigkeit der Höchstzugkraft von der Blechdicke, dem Punktabstandes und der Beanspruchungsrichtung dargestellt. Es wird erläutert, wie und ob sich die Grenznahtfunktionen durch wenige experimentelle Messpunkte ermitteln lassen. Abschließend werden die Ergebnisse der Auswertungen zu den Versuchsparametern dargestellt und ein kurzer Ausblick gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Als praktisches Beispiel wurde das Clinchen als punktförmig, mechanisch gefügte Verbindung für die vorliegende Arbeit ausgewählt. Es wurde ausschließlich das einstufige Clinchen mit ungeteilter Matrize genutzt (TOX-Rundpunkt). Die Werkzeuge wurden von der Firma TOX® PRESSOTECHNIK GmbH & Co.KG zur Verfügung gestellt.

2.1 Grundlagen

Das Clinchen wird nach der derzeit gültigen Norm DIN 8593-0 [Norm-51] und dem Merkblatt DVS/ESB 3420 [Norm-53] nach Hauptgruppe 4 dem Fügen durch Umformen zugeordnet. Die Einteilung der Fügeverfahren ist in Abb. 2.1 dargestellt.

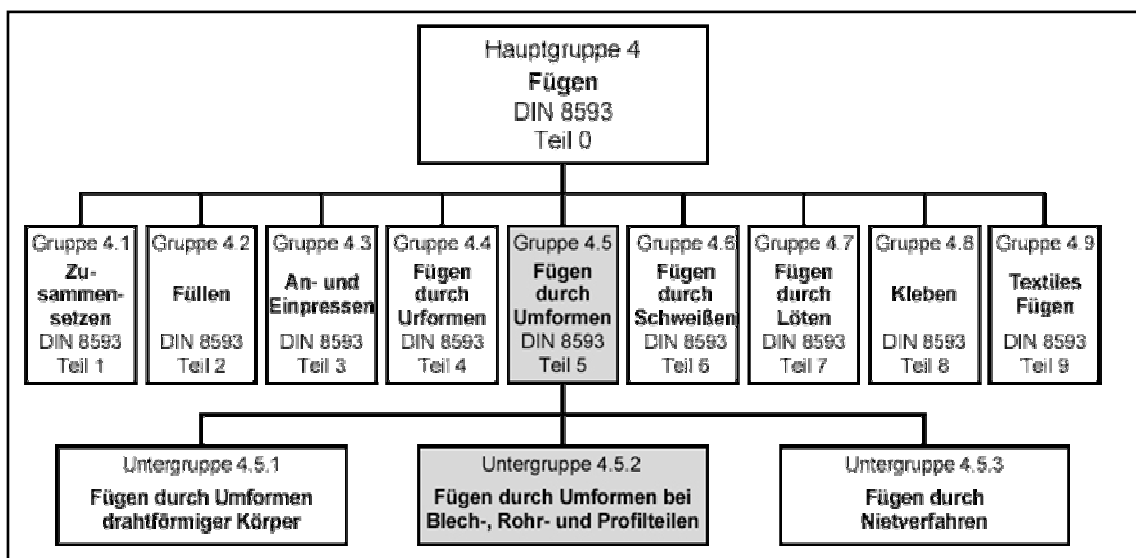
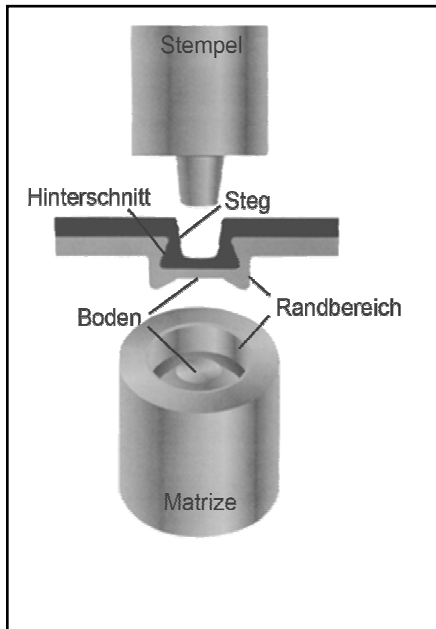


Abb. 2.1 : Einordnung der Fügeverfahren nach DIN 8593-0, Quelle: [Norm-51]

Die Hauptgruppe 4 ist in 9 Untergruppen unterteilt, welche die charakteristischen Merkmale der speziellen Fügeverfahren enthalten. Hierbei wird hauptsächlich hinsichtlich Kraft-/ , Form-/ oder Stoffschluss und der „Art des Zusammenhaltes“ unterschieden.

Clinchen definiert sich als Fügen von zwei oder mehr sich überlappenden Blechen, durch die mechanische Verformung, meist ohne Wärmeeinwirkung und ohne zusätzliche Verbindungselemente. Es entsteht dabei Kraft- und Formschluss. Die Umformung erfolgt definiert durch Matrize und Stempel, die passend zu der Blechkombination ausgewählt werden. Hierbei unterscheidet man weiterhin zwischen schneidendem und nicht-schneidendem Clinchen. Ebenso wird nach der Kinematik der Werkzeuge (geteilte/ungeteilte Matrize, einstufiges/mehrstufiges Fügen) unterschieden. [Norm-53]

In dieser Arbeit wird nur auf das einstufige, nicht-schneidende Clinchen mit starrer Matrize eingegangen. Hierbei werden runde Fügepunkte gesetzt. Zum besseren Verständnis wird im Folgenden ein kurzer Überblick ähnlicher Clinchverfahren, hinsichtlich der Werkzeuggeometrie gegeben.



Beim Clinchen mit starrer Matrize, wie z. B. dem in dieser Arbeit angewendeten TOX®-Rundpunkt, presst der Stempel das obere und untere Blech in die Matrize, wobei der Randbereich des Bodens der Matrize tiefer gearbeitet ist als die Mitte (siehe Abb. 2.2). Diese Geometrie der Matrize gewährleistet, dass das Material des unteren Bleches am Rand weiter nach unten fließen kann. Dadurch kann das obere Blech im Stegbereich das untere Blech hinterfließen. Dieses Hinterfließen erzeugt den sog. Hinterschnitt des oberen, hinter das untere Blech. Somit wird eine kraft- und formschlüssige Verbindung erzeugt (siehe Abb. 2.3).

Abb. 2.2: Schema TOX-Werkzeuge und Werkstück; Quelle: [TOX-03]

Diese Verbindungen werden beispielsweise in der Automobilindustrie eingesetzt. Sie besitzen keinen schneidenden Anteil. In Kombination mit entsprechender Klebetechnik können auf diese Art linear dichte Verbindungen hergestellt werden. Sie besitzen ein ästhetisches Erscheinungsbild und können auf verzinktem Blech eingesetzt werden, ohne die Zinkschicht zu beschädigen. Lackschichten werden nur gering geschädigt.

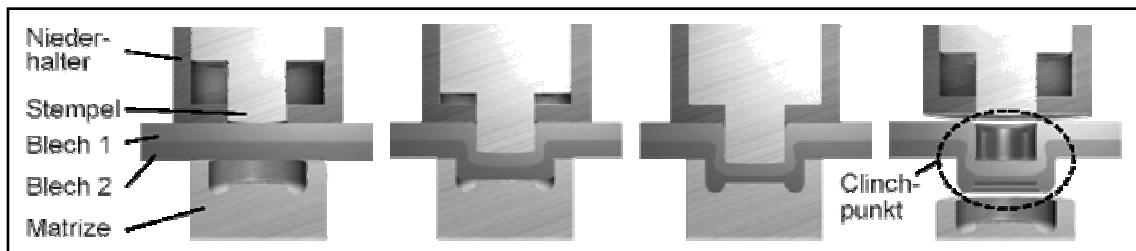


Abb. 2.3: Clinchen mit starrer Matrize, z. B. TOX®; Quelle: [MEN-04]

Das Clinchen mit geteilter¹ Matrize ist dem Clinchen mit ungeteilter Matrize sehr ähnlich. Wie die Bezeichnung verrät, liegt der Unterschied in der Geometrie der Matrize. Wenn der Stempel das Material in die Matrize presst und das untere Blech in den tiefe-

¹ Dieses Verfahren wurde z.B. von der Fa. Eckold patentiert.

ren Randbereich des Bodens und die Wandung der Matrize gedrückt wird, kann die Wandung im Gegensatz zur ungeteilten Matrize seitlich nachgeben. Das ermöglicht einen noch größeren Hinterschnitt des oberen hinter das untere Blech (siehe Abb. 2.4). Der Hintergrund liegt darin, dass die Clinchverbindung durch einen größeren Hinterschnitt einer größeren Beanspruchung standhalten kann.

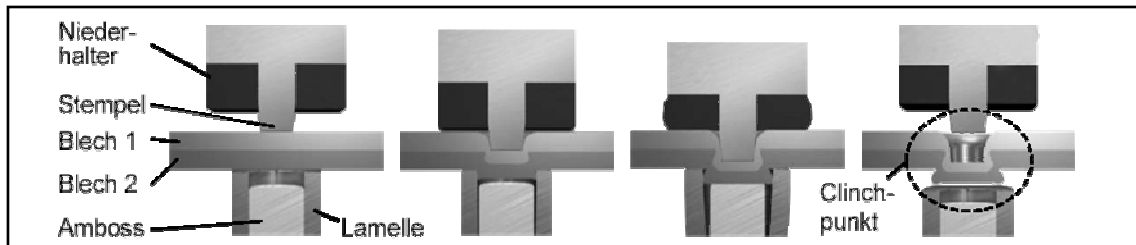


Abb. 2.4: Clinchen mit geteilter Matrize; Quelle: [MEN-04]

Beim matrizenlosen Clinchen ist keine eigentliche Matrize vorhanden. Vielmehr wird diese durch einen flachen Amboss ersetzt. Durch fein abgestimmte Fügeparameter ist es auch ohne Matrize möglich eine kraft- und formschlüssige Verbindung herzustellen. Wenn gleich die ertragbaren Spannungen einer solchen Verbindung nicht so hoch sind wie bei Clinch-Verbindungen z. B. mit starrer Matrize. Mit diesem verfahren können aber einseitig fast ebene Verbindung geschaffen werden, die als Sichtseite fast ohne Oberflächenbeeinträchtigung geeignet ist (siehe Abb. 2.5).

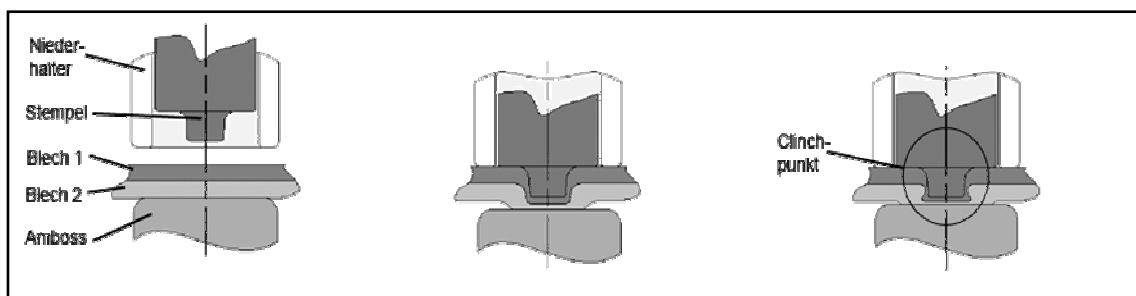


Abb. 2.5: Matrizenloses Clinchen

Wie allerdings oben schon erwähnt, werden in dieser Arbeit aber nur Versuchsreihen zum einstufigen Clinchen mit starrer Matrize, TOX®-Rundpunkt durchgeführt.

Vorteile des Clinchens gegenüber dem Widerstandspunktschweißen sind beispielsweise: Das Clinchen ist wirtschaftlicher als Widerstandspunktschweißen, es entsteht keine Wärmeeinflusszone im Fügebereich, kein Zusatzwerkstoff / Verbindungselement nötig, Verbindung unterschiedlicher Materialien und Blechdicken möglich, keine oder kaum Vor- und Nacharbeit im Fügebereich nötig, Fügen beschichteter Bleche (z. B. Verzinkt ohne Beschädigung möglich, lackierte Bleche bedingt) möglich, einfache Qualitätssicherung durch Prozessüberwachung der Fügeparameter und Bodendicke möglich. Nachteilig in dieser Hinsicht ist beispielsweise: die begrenzte Festigkeit durch

Mindestabstände der Clinchpunkte, das der dichte Verbund von Blechen nur in Kombination mit entsprechender Klebetechnik möglich ist, Clinchen mit Matrize ist ungeeignet für ebene Oberflächen auf Grund der Geometrie die Stempel/Matrize hinterlassen (wegen des äußeren Erscheinungsbildes).

Anwendung findet das Clinchen beispielsweise: in der Automobilindustrie (Motorhaube, Heckklappe, Türen, Kotflügel), der Blechverarbeitenden Industrie (Schaltschrankbau, Verkehrsschilder, Regalbau, Fensterrahmen, Computergehäuse, Industrietore, Lichtschächte), Lüftung und Klima (Lüftungsschächte & -kästen).

In der Automobilindustrie werden wegen des Korrosionsschutzes hauptsächlich verzinkte Bleche gefügt. Zunehmend werden aber auch Aluminium und Magnesiumlegierungen gefügt. Allerdings ist die Verarbeitung von Magnesiumlegierungen auf Grund der Materialeigenschaften oftmals aufwendiger. Da die Bruchdehnung der meisten Magnesiumlegierungen bei Raumtemperatur unter dem zulässigen Grenzwert² liegt, muss der Fügevorgang unter Umständen temperiert durchgeführt werden.

Auch in anderen Blech verarbeitenden Industriezweigen kommt das Clinchen häufig zum Einsatz, beispielsweise für die Herstellung von Lüftungskanälen, Waschmaschinen oder im Regalbau.

2.2 Berechnungsmethoden punktförmig gefügter Verbindungen

Im Folgenden wird als Beispiel die Bemessung für Schraub- und Nietverbindungen laut DIN18800 angeführt. Im Vergleich dazu wird die aktuelle Berechnungsgrundlage für punktförmig, mechanisch gefügte Verbindungen erläutert.

2.2.1 Stahlbau DIN 18800

Während im Stahlbau die Berechnung einer Konstruktion über zulässige Spannungen in der DIN 18800 [Norm-54] geregelt ist, existiert eine Berechnungsgrundlage für das Clinchen nur in Ansätzen. Die Berechnung punktförmig gefügter Verbindungen erfolgt derzeit nur auf Basis der ertragbaren Höchstzugkraft je Verbindungspunkt bzw. erfolgt auf Grund von Erfahrungswerten.

Bei Schraubverbindungen[Norm-54] wird prinzipiell, wie bisher auch beim Clinchen, mit Grenzzugkräften bzw. mit Grenzabscherkräften je Verbindung gerechnet. Für

² Nach DVS/EFB 3420: bedingt Clinchgeeignet (Einzelprüfung notwendig): $12\% > A_{80} = 8\%$; $(R_{p0,2}/R_m) > 0,7$; $500\text{MPa} < R_m < 700\text{MPa}$ [Norm-53]

Schraubverbindungen finden sich diese Werte in der DIN 18800. Dabei wird im Allgemeinen nur nach Festigkeit der Schraube, Nenndurchmesser und Belastungsrichtung der Verbindung unterschieden wird. Weiterhin ist auf Rand- und Schraubenabstände zu achten, die jeweils auch der DIN 18800 zu entnehmen sind. In diesem Fall wäre das korrekte Vorgehen, die Spannungen aus der Konstruktion auf die Höchstzugkraft des Verbindungselementes umzurechnen. Allerdings werden Schraubverbindungen selten als „Punktnaht“ ausgebildet wie es z. B. für Widerstandspunktschweißungen im Karosseriebau üblich ist. Daher ist diese Berechnungsmethode im Bereich des Stahlbaus ausreichend.

Vorteilhaft bei der Bemessung einer Schraubverbindung ist im Gegensatz zum Clinchen, das ein Fügeelement bekannten Werkstoffes und genormter Festigkeit benutzt wird, was eine standardisierte Berechnung ermöglicht. Wenn man sich bei dieser Berechnungsmethode an der Norm orientiert, so beschränken sich die veränderlichen Einflüsse auf das Fügeelement bzw. die Anzahl der Fügeelemente.

Im Gegensatz dazu hat beim punktförmig, mechanischen Fügen immer der Grundwerkstoff sowohl auf das Fügen, als auch auf die spätere Festigkeit der Verbindung einen entscheidenden Einfluss. Somit sind zur Bemessung einer Clinchverbindung beispielsweise die Fragen zu klären welche Grundwerkstofffestigkeit vorliegt, welche Blechdicken gefügt werden sollen, welche Bruchdehnung der Werkstoff aufweist und ob bei Raumtemperatur gefügt werden kann und welche Festigkeit die Verbindung gewährleistet.

2.2.2 Punktförmig gefügte Verbindungen

Die Bemessung von Clinchverbindungen ist in der Praxis derzeit noch sehr aufwendig und für komplexe Bauteile für kleine und mittelständige Betriebe auf Grund zu hoher Entwicklungskosten unwirtschaftlich. [HSD-01]

Oftmals liegen der Bemessung von Clinchverbindungen experimentell ermittelte Höchstzugwerte zu Grunde. Dabei werden Einpunkt Proben im Zugversuch auf ihre Höchstzugkraft geprüft, wobei die Probengeometrien meist standardisiert nach Merkblatt DVS/EFB 3420 [Norm-53] ausgeführt wird. Diese experimentell ermittelten Höchstzugwerte für Einpunktproben stellen somit oftmals die Grundlage für die Bemessung komplexer Bauteile und Baugruppen dar. Unterschieden wird bei den Belastungsfällen nach Scherzug, Schälzug und Kopfzug. Ob die Verbindungen den Beanspruchungen standhalten, wird meist durch aufwendige und langwierige Versuche und Tests untersucht (auch Langzeit- u. Dauerschwingtests bei Schwingungsbeanspruchten Bauteilen).

Diese Art der Bemessung ist sehr umständlich für den Konstrukteur, der vor allem in kleinen und mittelständigen Betrieben für die Bemessung der Konstruktionen ein Spannungsmodell zu Grunde liegen hat. Für eine Berechnung der Verbindungspunkte ist es somit nötig die Spannungen aus dem Modell für den jeweiligen Werkstoff und dessen Dicke auf die ertragbare Höchstzugkraft je Punktverbindungen umzurechnen. Es ist daher gängige Praxis, die Verbindungspunkte der Konstruktion überschlägig und nach Erfahrungswerten zu bemessen und etwaige Schwachstellen durch Beanspruchungsversuche aufzudecken.

2.2.3 Lösungsansatz für punktförmige Fügenähte

Clinchverbindungen werden oftmals genutzt um komplexe Bauteile zu verbinden. Meist werden zum Fügen viele, aneinander gereihte Clinchpunkte in einem bestimmten Abstand zueinander gesetzt. Um von dem bisherigen Ansatz Abstand zu nehmen, die Punktverbindungen als einzelne Verbindungspunkte zu betrachten und zu berechnen, wurde für das Konstruktionssystem³ der Ansatz der Punktnaht gewählt. Darin sollen die Verbindungspunkte nicht unabhängig von einander betrachtet werden, sondern dem gesamten Verbindungsbereich (der „Punktnaht“) eine Festigkeitseigenschaft einbeschrieben werden. Die Punktnaht / der Verbindungsbereich wird dabei als „Black-Box“ betrachtet, die eine maximal zulässige Spannung in diesem Bereich übertragen kann. Dabei wird die Höchstzugkraft der einzelnen Verbindung durch die Materialdicke und den speziellen Punktabstand dividiert und kann somit als ertragbare Spannung für die entsprechende Verbindungsbreite angegeben werden. In Abb. 2.6 sind die Eigenschaftsbereiche gekennzeichnet. [S61-08]

³ Bemessungsmodell für punktförmig, mechanisch gefügte Verbindungen (in der Entwicklungsphase am Fraunhofer-IWU)

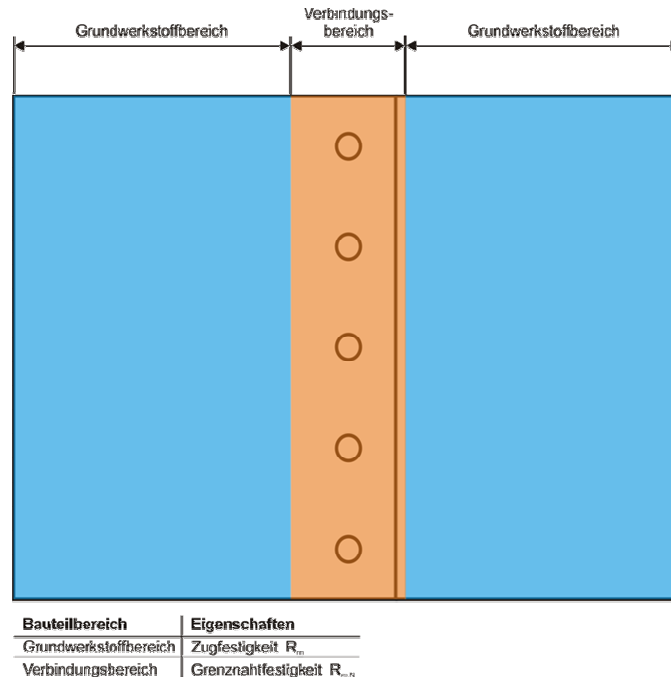


Abb. 2.6: Schematische Darstellung der Eigenschaftsbereiche für punktförmig gefügte Bauteile; Quelle: [S61-08]

In Abb. 2.7 ist die Spannungsverteilung einer solchen Verbindung unter Scherzugbeanspruchung in einem Simulationsmodell dargestellt. Auf Grund von verschiedenen Einflussfaktoren, die in diesem Modell nicht abgebildet sind, ist anzunehmen, dass die wahre Spannungsverteilung noch viel komplexer ist als in Abb. 2.7 dargestellt, da jeder Verbindung ein sehr komplexer Übertragungsmechanismus von Kräften und Momenten zu Grunde liegt.

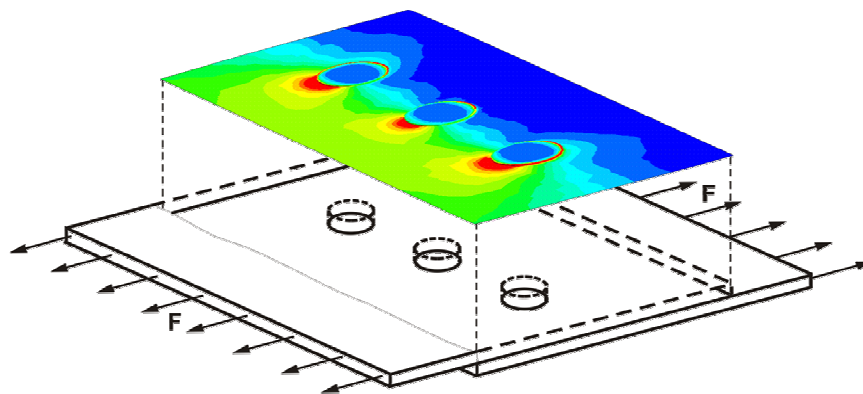


Abb. 2.7: Spannungsverteilung einer punktförmig, mechanisch gefügten Verbindungsnaht; Quelle: [S61-08]

3 Theoretische Betrachtung

3.1 Vorbetrachtung

3.1.1 Problemstellung

Um ertragbare Spannungen als Grenznahtkurve für punktförmige Fügenähte darstellen zu können, ist es nötig die Abhängigkeit der Höchstzugkraft von der Punktzahl, den Punktabständen, der Blechdicke und der Blechdickenkombination zu ermitteln.

Untersuchung der Abhängigkeit der Höchstzugkraft von:

- Punktzahl n
- Punktabstand e
- Blechdicke t
- Blechdickenkombination t_1/t_2

3.1.2 Geplanter Lösungsweg

Es ist geplant an mehreren Versuchsreihen die statische Festigkeit mit Hilfe des Zugversuches zu ermitteln. Innerhalb einer Versuchsreihe wird die Höchstzugkraft in Abhängigkeit der *Punktzahl* und des *Punktabstandes* für eine *Blechdicke* bzw. *Blechkombination* ermittelt. Die Kennzeichnung der Versuchsreihe erfolgt folgendermaßen:

Versuchsreihe 1,5/1,5 ($t_1=1,5\text{mm}$; $t_2=1,5\text{mm}$)

Die Höchstzugwerte werden für Scher- als auch für den Schälzugbeanspruchung für sechs Versuchsreihen ermittelt.

Zur Verfügung stehende Blechdicken: 0,75mm; 1,25mm; 1,5mm; 2,5mm

Werkstoff: DC04 im Anlieferungszustand, unbeschichtet

Prüfverfahren:

Scherzugversuch nach DVS-Merkblatt 3480

Schälzugversuch nach DVS-Merkblatt 3480

Geplante Versuchsreihen: 0,75/0,75; 1,5/1,5; 2,5/2,5; 1,5/0,75; 0,75/1,5; 1,25/2,5

Überblick der Randbedingungen:











Parameter	Formelzeichen	Wert
Probenbreite	b	$b_i = n_i \times e_i$
Punktanzahl	n	1; 2; 3; 4
Punktabstand	e	12; 16; 20; 30; 45
Überlappungslänge	$l_{\bar{u}}$	20
Freie Einspannlänge	l_f	95
Zuschnittlänge	l_i	105
Innenbiegeradius (für Schälzugproben)	r	5

Tab. 3.1: Übersicht experimentelle Randbedingungen

Probenbreite für Punktanzahlen		e_i				
		12	16	20	30	45
b für n=	1	12	16	20	30	45
b für n=	2	24	32	40	60	90
b für n=	3	36	48	60	90	135
b für n=	4	48	64	80	120	180

Tab. 3.2: Gesamtprobenbreite für unterschiedliche Punktanzahlen

Für jede Punktanzahl (z.B. $n=1$) ergeben sich 5 verschiedene Punktabstände ($e=12; 16; 20; 30; 45$) und somit 5 verschiedene Höchstzugkräfte $F_{H,mittel}$. Jeder Messpunkt (jeder Punktabstand einer bestimmten Punktanzahl einer Versuchsreihe) wird aus einem Probenumfang von 5 Einzelproben bestimmt. Das heißt jeder Mittelwert der Höchstzugkraft der für spätere Berechnungen herangezogen wird, ergibt sich aus 5 Einzelmessungen (siehe Tab. 3.3).

Probenanzahl jeweils für Scher- und Schälzug		e [mm]		12					16					20					30					45				
		n		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
		t1 [mm]	t2 [mm]																									
TOX Rundpunkt 8mm	1,5	1,5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	0,75	0,75	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	1,5	0,75	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	0,75	1,5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
TOX Rundpunkt 10mm	2,5	2,5						5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	1,25	2,5						5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Tab. 3.3: Probenzuschnitte jeweils für Scher-/ Schälzug

Auf Grund der Vielzahl der herzustellenden Probenbleche waren die Messungen sehr zeitaufwendig. Die Tab. 3.3 gibt nur einen kurzen Eindruck von dem Arbeitsumfang. Die daraus resultierende Anzahl der Probenbleche wurden jeweils für die Scher- und Schälzugproben angefertigt.

3.1.3 Vermutung/Hypothese

Anhand der Zugproben sollen Abhängigkeiten der Höchstzugkraft zum Punktabstand, zur Punktzahl, Blechdicke und Blechdickenkombination untersucht werden. Eventuelle Abhängigkeiten wären sehr hilfreich für das Konstruktionssystem sein, wenn sich daraus eine analytische Berechnungsvorschrift ableiten lässt.

Wie aus [RIE-05] hervorgeht, besteht ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen der Höchstzugkraft und der Punktzahl einer Clinchnaht. Grafisch dargestellt ergibt sich in einem Höchstzugkraft-Gesamtprobenbreite-Diagramm (siehe Abb. 4.18) somit eine Messpunktreihe die durch eine lineare Trendlinie interpoliert werden kann. Diese Trendlinie (lineare Funktion) besitzt einen Anstieg, der indirekt die Festigkeit der Verbindung widerspiegelt. Für größere Punktabstände wird der Anstieg der Gerade immer kleiner (weniger Verbindungspunkte je mm Clinchnaht umso geringere Festigkeit).

Wenn sich die Möglichkeit der analytischen Berechnung der Eigenschaftsfelder anhand weniger Messpunkte, für unterschiedliche Verbindungen, realisieren lässt, bedeutet das für spätere Untersuchungen und Versuchsreihen einen sehr viel geringeren Untersuchungsaufwand und damit verbundene Zeitersparnis. Falls sich die Vermutung bestätigt, dass die Verbindungen kaum abhängig von der Blechsteifigkeit und der gegenseitigen Beeinflussung der Fügepunkte sind, müsste nur ein Faktor für den Einfluss der Werkstofffestigkeit in die Berechnung einbezogen werden.

3.1.4 Untersuchungsumfang

Beschreibung der Randbedingungen zur Untersuchung für punktförmige Fügenähte

Um die Einflüsse und Abhängigkeiten einer Fügenaht zu ermitteln, werden 1-Punkt, 2-Punkt, 3-Punkt und 4-Punktproben angefertigt, jeweils mit einem Umfang von $n = 5$. Es werden Proben für verschiedene Clinchverbindungsabstände $e = 12\text{mm}$, $e = 16\text{mm}$, $e = 20\text{mm}$, $e = 30\text{mm}$ und $e = 45\text{mm}$ untersucht. In diesem Umfang werden sowohl Scher- als auch Schälzugproben angefertigt. Die gefügten Probenbleche werden danach auf ihre statische Festigkeit durch einen Standard-Zugversuch ($v = 10\text{mm/min}$) untersucht. Dabei wird die ermittelte Höchstzugkraft als Maß der Festigkeit für die jeweilige Verbindung verwendet, da sie die einzige reproduzierbare Kenngröße für Clinchverbindungen darstellt. Diese Tatsache wurde experimentell ermittelt [RIE-05] und lässt eine hohe Komplexität der Vorgänge beim Versagen von Clinchverbindungen

vermuten.

Die ermittelten Werte werden zur Auswertung in Diagramme eingetragen in denen die Abhängigkeit der Höchstzugkraft von der Gesamtprobenbreite ersichtlich ist.

Diese Diagramme und die sich daraus ergebenden Kurven sollen auch zur Entwicklung einer analytischen Berechnungsgrundlage dienen. Dabei werden die Punkte der Höchstzugkräfte gleicher Punktzahlen (z. B. $n = 2$ –siehe Abb. 3.1) der unterschiedlichen Punktabstände verbunden. Die sich daraus ergebende Kurve gibt Aufschluss über das Verhalten der Höchstzugkraft zum Punktabstand, bzw. zur Probenbreite.

Die Kurve in Abb. 3.1 zeigt eine verbindungspunktabhängige, ertragbare Höchstzugkraft für die Fügenaht eines Probenbleches mit 2 TOX-Clinchverbindungen für die Blechkombination 1,5/1,5 mit Standardabweichung(rot). Der Kurvenverlauf kann bei Ausnahme des vorderen Bereiches für $b < 40\text{mm}$, als konstant angesehen werden. Dieser Kurvenverlauf sollte sich qualitativ für jede beliebige Blechkombination reproduzieren lassen, der Unterschied sollte nur in der ertragbaren Höchstzugkraft liegen. Diese dient der Erstellung des Eigenschaftsfeldes (s. Abschnitt 6.3)

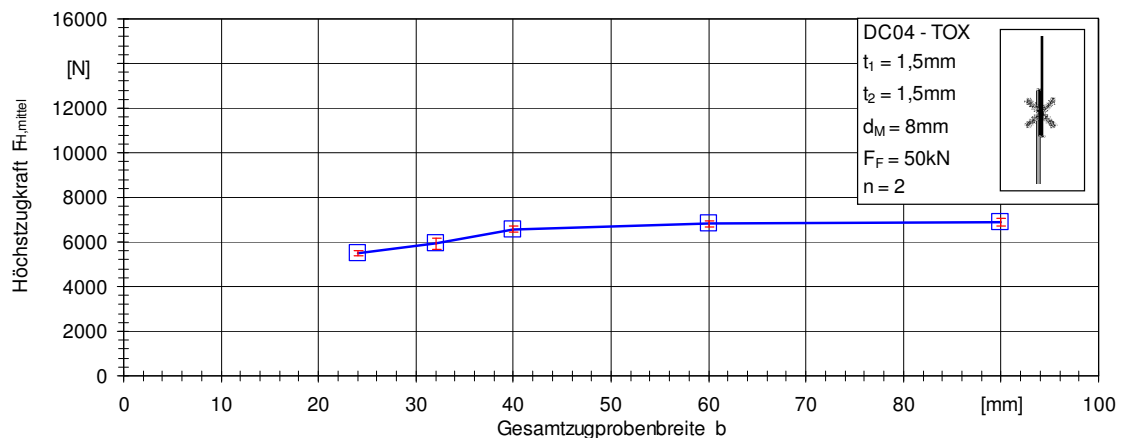


Abb. 3.1: Darstellung der Höchstzugkraft über Gesamtprobenbreite der Versuchsreihe 1,5/1,5; Scherzug für $n=2$

Beanspruchungsrichtungen

Bei den Beanspruchungsfällen unterscheidet man grundlegend zwischen Scherzug und Schälzug, der dem Kopfzug ähnelt. Beim Scherzug wird die Verbindung auf Abscheren beansprucht. Das Versagen der Verbindung kann allerdings je nach Werkstoff und Materialdicke /-kombination variieren. Beispielhaft wäre eine mögliche Versagenskombination aus teilweisem Abscheren + Verformung der Bleche im Überlappungsbereich + Ausknöpfen. Man spricht bei diesem Beanspruchungsfall i. A. von einem Beanspruchungswinkel von 0° .

Bei Schäl- und Kopfzug hingegen wird die Clinchverbindung auf Ausknöpfen beansprucht. Der Beanspruchungswinkel beträgt 90° . Skizzen zu diesen Beanspruchungen finden sich in Abb. 3.2. Der Beanspruchungsfall Kopfzug wird in dieser Arbeit nicht untersucht.

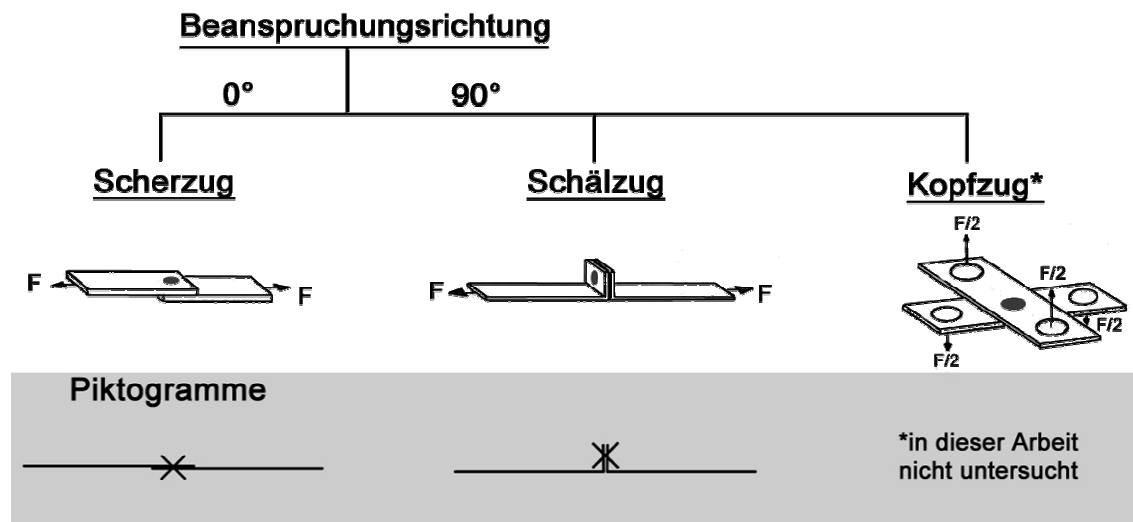


Abb. 3.2: Skizze der Beanspruchungsrichtungen

3.2 Ergebnisgrößen / Herleitungen

3.2.1 Höchstzugkraft

Die Höchstzugkraft ist die im quasistatischen Zugversuch ($v = 10 \text{ mm/min}$) höchste erreichbare Zugkraft, der die Zugprobe standhalten kann. In der Praxis hat die Höchstzugkraft keine Relevanz, da sie immer mit plastischer Verformung und irreparabel Beschädigung einhergeht. Dieser Fall würde in der Praxis das Versagen des Bauteils bedeuten. Daher ist der Einsatz der Höchstzugkraft für praktische Berechnungen indiskutabel. Allerdings stellt die Höchstzugkraft für Clinchverbindungen die einzige reproduzierbare Größe hinsichtlich der Festigkeit der Verbindung dar [RIE-05]. Aus diesem Grund gehen alle Ergebnis und Auswertungen in dieser Arbeit direkt auf die Höchstzugkraft zurück. Abb. 3.3 zeigt die Höchstzugkraft am Beispiel des Kraft-Weg-Verlaufes einer Scherzugprobe.

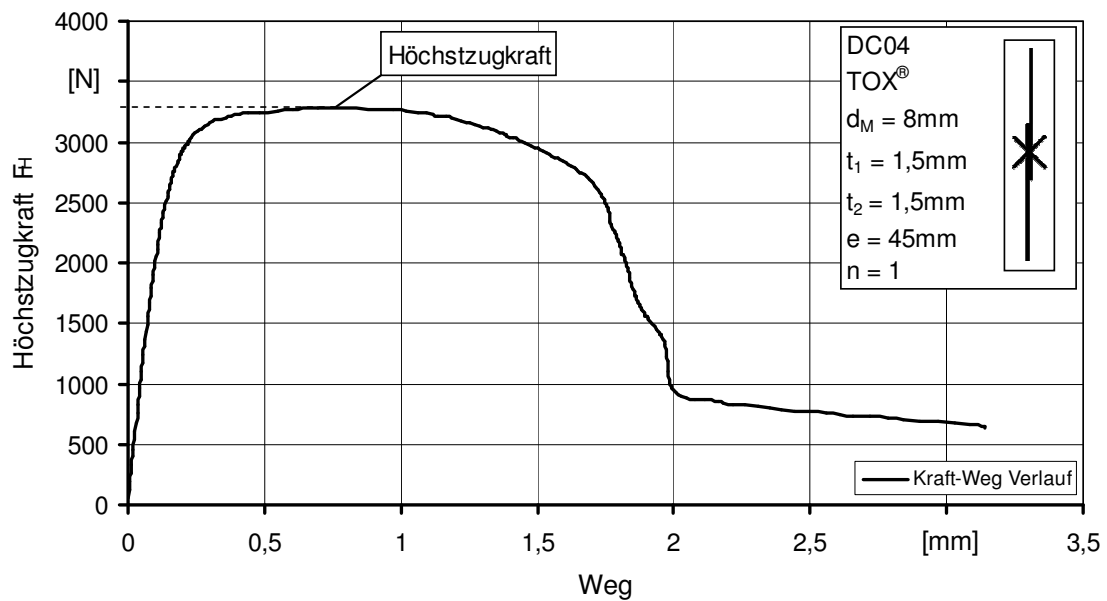


Abb. 3.3: Kraft-Weg-Verlauf eines Scherzugversuches, Versuchsreihe 1,5/1,5

3.2.2 Grenznahtfestigkeit

Die Grenznahtfestigkeit ist eine der Grundwerkstofffestigkeit ähnliche Kenngröße. Hierbei wird von einer fiktiven, über den gesamten Querschnitt ertragbaren Spannung ausgegangen und nicht die einzelne Verbindung betrachtet. Die Grenznahtfestigkeit basiert also auf Spannungen, und nicht wie bisher üblich auf ertragbaren Höchstzugkräften je Verbindung. Der Ansatz ist vergleichbar dem für Schweißverbindungen, nur dass die Verbindung nicht durchgängig ist, sondern eine Aneinanderreihung von Punktverbindungen darstellt. In Abb. 3.4 ist das Prinzip der Transformation der Höchstzugkraft in ertragbare Spannungen dargestellt. [MRL-06]

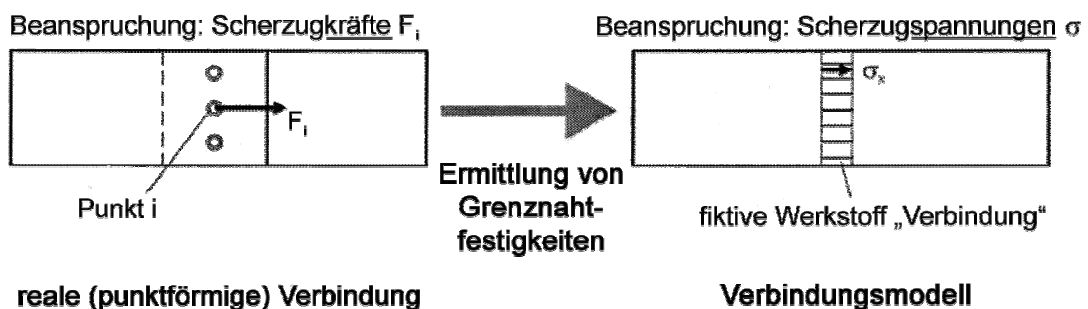


Abb. 3.4: Transformation von Höchstzugkräften zu Spannungen; Quelle: [MRL-06]

Die Grenznahtfestigkeit ist abhängig von den mechanischen Eigenschaften der einzelnen Verbindungen und den Eigenschaften der Naht, also der Anordnung der Verbindungen. Für unterschiedliche Beanspruchungszustände ergeben sich für die gleiche Verbindung verschiedene Grenznahtfestigkeiten, wobei die des Scherzuges immer am

höchsten und die des Schälzuges immer am niedrigsten ist. Diese Tatsache gründet sich auf der Beanspruchungsrichtung und wurde experimentell belegt. Für das allgemeine Verständnis dient als Analogie der Druckknopf. Dieser lässt sich unter Schälzugbeanspruchung leicht öffnen, während er unter Scherzugbeanspruchung große Kräfte aufnehmen kann. Für jede Material- oder Blechdickenkombination ergibt sich eine Grenznahtfestigkeitskurve (siehe Anhang), die charakteristisch für die Verbindung ist und nur noch von der Materialfestigkeit abhängt.

3.2.3 Grenznahtfestigkeit, bezogen auf Clinchverbindungen

In der Auswertung der geclinchten Scher- Schäl- und 45°-Schrägzugproben werden über den untersuchten Abständen e die zugehörigen Grenznahtfestigkeiten $R_{m,Naht}$ aufgetragen (siehe Tab. 3.4). „In Folge unvorhersehbarer Fehlereinflüsse bei der Probenanfertigung und der experimentellen Untersuchung entspricht der Exponent α nicht dem zu erwartenden Wert $\alpha=1$.“ (siehe Abb. 3.5) Der Exponent α ist der Exponent der Grenznahtkurve. Ausgehend von den eingetragenen Wertepaaren $(R_{m,Naht}, e)$ werden in den Grenznahtkurven zwischen dem kleinsten und größten Verbindungsabstand e Trendlinien vom Typ $R_{m,Naht}(a) = m \cdot (1/e)^a$ eingetragen. Für jede Versuchsreihe ergibt sich dadurch je Beanspruchungsfall, Grundwerkstoff und Blechdicke eine Grenznahtkurve mit angenähert hyperbolischem Verlauf der Trendlinie der Grenznahtfestigkeit $R_{m,Naht}$ über dem Verbindungsabstand e . Dabei fallen Abweichungen der Exponenten α von dem theoretisch begründeten Wert $\alpha=1$ auf. Zusätzlich wurden die normierten Grenznahtkurven aufgetragen (siehe Abschnitt 3.2.4). Infolge der Unterschiede zwischen den Koeffizienten und Exponenten der Funktionen der Trendlinie und der zugehörigen normierten Grenznahtkurve (siehe Abb. 3.6) sind beide Kurven erwartungsgemäß nicht identisch. Jede Grenznahtkurve die als Trendlinie der experimentell ermittelten Höchstzugwerte basiert, hat einen anderen Exponenten. Um die Grenznahtkurven in diesem Punkt vergleichbar darstellen zu können, ist es nötig den Exponent aller Grenznahtfunktionen auf den Wert $\alpha=1$ zu normieren (siehe Abschnitt 3.2.4). [MRL-06]

Die Grenznahtkurve stellt die Grenznahtfestigkeit grafisch als Funktion für unterschiedliche Punktabstände dar. Sie ermöglicht den direkten Einblick in die Verbindungsfestigkeit einer Clinchverbindung für den zugehörigen Verbindungsabstand. Im weiteren Verlauf der Arbeit erscheint die normierte Grenznahtkurve als Grenznahtfestigkeitskurve.

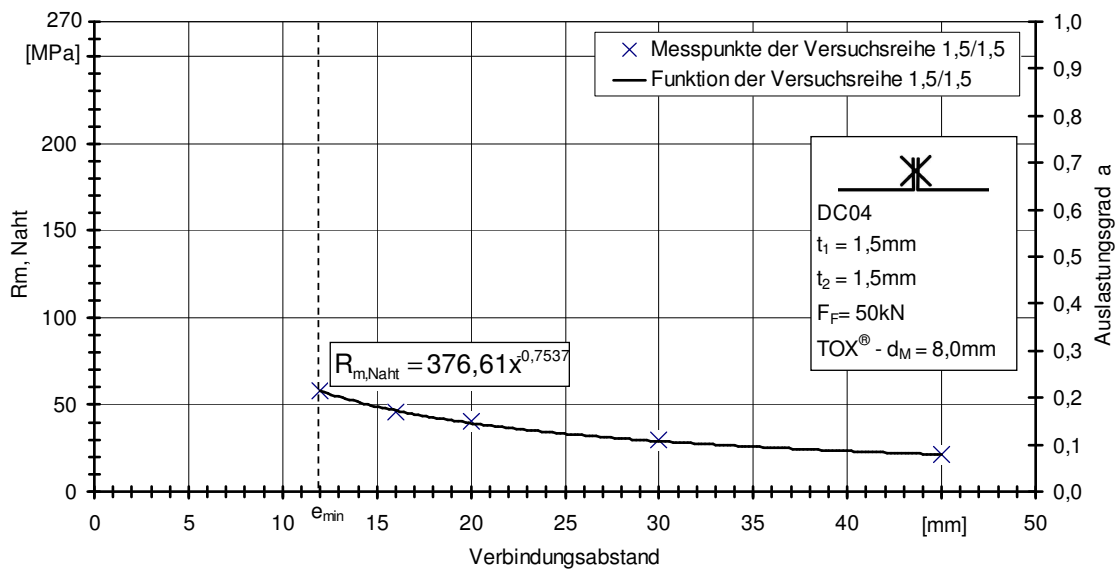


Abb. 3.5: Darstellung der experimentell ermittelten Grenznahtkurve, $\alpha < 1,0$, unter Schälzugbeanspruchung, Versuchsreihe 1,5/1,5

3.2.4 Normiert Grenznahtfestigkeitskurve

Die normiert Grenznahtkurve beschreibt die Abhängigkeit der Grenznahtfestigkeit von dem Verbindungsabstand e mittels der Funktion:

$$R_{m,Naht}(e) = \frac{K}{e} \quad (3.1)$$

Für die normiert Grenznahtkurve nimmt der Exponent α immer den Wert $\alpha=1$ ein. Mittels des Koeffizienten K kann in Gl. $R_{m,Naht} = \frac{F_m}{n \cdot e \cdot t}$ (6.6) substituiert werden.

$$K = \frac{F_m}{n \cdot t} = \frac{F_{m,n=1}}{t} \quad (3.2)$$

Ansatz zur Bestimmung der normierten Grenznahtfestigkeitskurve

[MRL-06]: Die Grenznahtkurven leiten sich aus den Ergebnissen der Zugversuche her und beinhalten folglich Fehlereinflüsse. „Speziell der Exponent α der mit einem theoretischen Wert $\alpha=1$ zu erwarten wäre“ weist Abweichungen auf, die jedoch keinerlei ersichtlicher Systematik unterliegen. Um mit einem vergleichbaren Wert für $\alpha=1$ arbeiten zu können wird daher eine Normierung der Grenznahtkurven nach dem ersten Vorschlag aus [MRL-06] durchgeführt. Dieser Vorschlag zur Normierung von Grenznahtkurven beruht auf der Normierung über die Anzahl der Verbindungspunkte n . Speziell dazu wurden Versuche durchgeführt und Probenbleche mit unterschiedlichen Punktab-

ständen ($e=12, 16, 20, 30, 45\text{mm}$) und Punktzahlen ($n=1, 2, 3, 4$) angefertigt. Je Kombination (z.B.: $n=1, e=12\text{mm}$) wurden 5 Versuche durchgeführt und deren Ergebnisse gemittelt, wie bereits zur Ermittlung der realen Wertepaare erläutert.

Bei der Normierung über die Anzahl der Verbindungspunkte wird für jeden Verbindungsabstand e_i ein Koeffizient K_i nach Gleichung (3.3) errechnet. Dabei wird die Höchstzugkraft $F_{H,i}$ der unterschiedlichen Anzahlen von Verbindungen (1 bis 4 Punkte) aufsummiert und durch die Blechdicke sowie die Summe der Anzahl der Verbindungen dividiert.

$$K_i = \frac{\sum_{j=1}^J F_{Hj}}{t \sum_{j=1}^J n_j} \quad (3.3)$$

Anschließend wird aus den jeweiligen Verbindungsabständen e_i zugeordneten Werten des Koeffizienten K_i der arithmetische Mittelwert gebildet, der dem Koeffizienten K der normierten Grenznahtkurve entspricht.

$$K = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I K_i = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left(\frac{\sum_{j=1}^J F_{Hj}}{t \sum_{j=1}^J n_j} \right)_i \quad (3.4)$$

Werden die Gleichungen (3.3) und (3.4) auf die Versuchsergebnisse übertragen, so ergeben sich folgende Beziehungen:

$$K_i = \frac{F_{H,n=1} + F_{H,n=2} + F_{H,n=3} + F_{H,n=4}}{t \cdot (1+2+3+4)} = \frac{F_{H,n=1} + F_{H,n=2} + F_{H,n=3} + F_{H,n=4}}{t \cdot 10} \quad (3.5)$$

sowie:

$$K = \frac{1}{4} (K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5) = \frac{1}{5} \left[\left(\frac{F_{H,n=1} + F_{H,n=2} + F_{H,n=3} + F_{H,n=4}}{t \cdot 10} \right)_{e=12\text{mm}} + \left(\frac{F_{H,n=1} + F_{H,n=2} + F_{H,n=3} + F_{H,n=4}}{t \cdot 10} \right)_{e=16\text{mm}} + \left(\frac{F_{H,n=1} + F_{H,n=2} + F_{H,n=3} + F_{H,n=4}}{t \cdot 10} \right)_{e=20\text{mm}} + \left(\frac{F_{H,n=1} + F_{H,n=2} + F_{H,n=3} + F_{H,n=4}}{t \cdot 10} \right)_{e=30\text{mm}} + \left(\frac{F_{H,n=1} + F_{H,n=2} + F_{H,n=3} + F_{H,n=4}}{t \cdot 10} \right)_{e=45\text{mm}} \right] \quad (3.6)$$

Die auf diese Art ermittelten Werte für K_i sind im Anhang in den Tabellen der „Messwerte und Auswertung“ aufgeführt. Tab. 3.4 zeigt einen Auszug dieser Tabelle. Die Einheit a stellt den Auslastungsgrad bezüglich der Grundwerkstofffestigkeit dar und ist in diesem Fall der Quotient von R_i und $R_{m, \min}$.

Normierte Grenznahtfestigkeitskurve					
	Verbindungsabstand e [mm]				
	12	16	20	30	45
K_i [N/mm]	1915	2114	2196	2246	2215
K_m [N]	2137				
R_i [MPa]	178	134	107	71	47
a	0,66	0,49	0,40	0,26	0,18

Tab. 3.4: Tabelle der Werte für die normierte Grenznahtkurve

Die Werte von R_i und e werden im Diagramm (siehe Abb. 3.6) in Abhängigkeit von e dargestellt. In diesem ist leicht ersichtlich welchen Wert einer Spannung für den jeweiligen Punktabstand e durch die Clinchverbindungen übertragen werden kann.

Das Diagramm in Abb. 3.6 stellt die reale Grenznahtfunktion der Clinchverbindung in Abhängigkeit des Verbindungsabstandes (blau), sowie die Standardabweichung von $R_{m,N}$ (roter Balken) dar. Ebenfalls dargestellt ist die normierte Grenznahtkurve (schwarz). Angezeigt wird auch ihre Funktion und der Höchstwert, sowohl der Zahlenwert, als auch der Auslastungsgrad

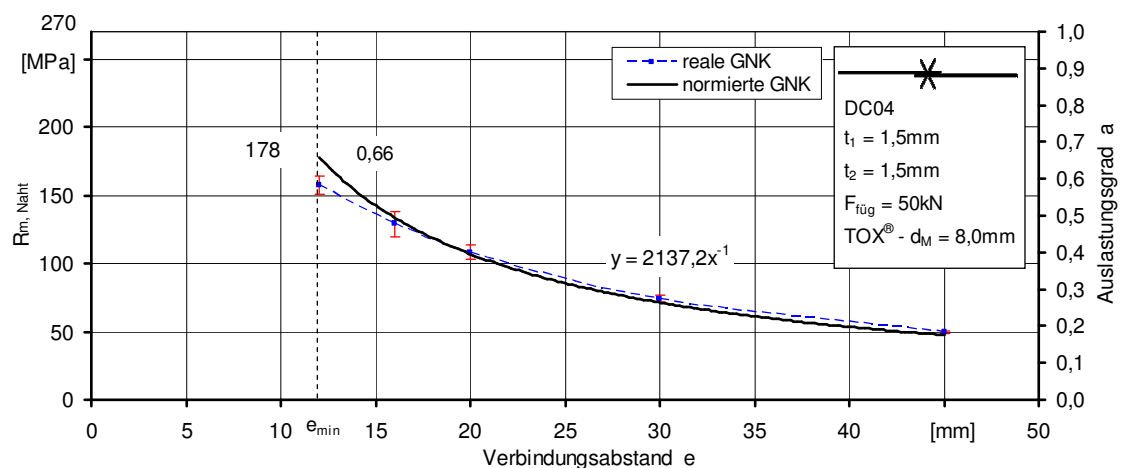


Abb. 3.6: Grenznahtkurven der Reihe 1,5/1,5, real und normiert

4 Experimentelles Vorgehen

4.1 Probenherstellung

4.1.1 Angaben zum Werkstoff / Kennwerte

Ausgangswerkstoff für alle hier aufgeführten Versuche ist DC04 (St14). Er wurde ausgewählt, da er ein Tiefziehstahl mit großer Bruchdehnung (51,1%) ist und häufig im Fahrzeugbau eingesetzt wird. Er lässt er sich gut umformen und ist somit sehr gut zum umformenden Fügen durch Clinchen geeignet.

Werkstoffdaten:

DC04, Feinblech kaltgewalzt, FePO₄, St14, EN 10130

Mindestzugfestigkeit :	$R_m = 270$	MPa
Elastizitätsmodul:	$E = 2,1 \cdot 10^4$	MPa
Schubmodul:	$G = 8,1 \cdot 10^3$	MPa
Spez. Gewicht:	$\gamma = 7,85$	g/cm ³
Wärmedehnzahl:	$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$	K ⁻¹
Querdehnzahl:	$\mu = 7,850 \cdot 10^{-1}$	

4.1.2 Probengeometrie

Die Probengeometrie steht im direkten Zusammenhang mit dem Punktabstand e . Die Breite b ist ein Vielfaches von e , je nachdem wie viele Fügepunkte (n) die Zugprobe beinhaltet. Der Randabstand beträgt stets $e/2$.

Die Länge der Proben ist mit 105mm nach DVS-Merkblatt 3480 [Norm-55] ausgewählt. Gefügt beträgt die Länge einer Scherzugprobe 190mm, da die Überlappung \ddot{U} mit 20mm festgelegt wurde. Die Überlappung der Probenbleche wurde nach keiner speziellen Norm ausgewählt, sondern nach praktischer Relevanz, da die Vorgaben des DVS-Merkblattes 3480 [Norm-55] mit mindestens 35mm einen sehr breiten Verbindungsbereich/Überlappungsbereich vorgeben.

Außerdem entsprechen die 20mm einer Seitenlänge der Verbindungsfläche von 20mm x 20mm, die als optimale Querschnittsfläche für solche Clinchverbindungen ermittelt wurde [RIE-05].

Da unter anderem der Einfluss der Probenbreite auf die Höchstzugkraft untersucht wurde, variiert diese, da $b = n \cdot e$, und $e = 12\text{mm}/16\text{mm}/20\text{mm}/30\text{mm}/45\text{mm}$. In Abb. 4.1 sind die Skizzen der Zugproben dargestellt.

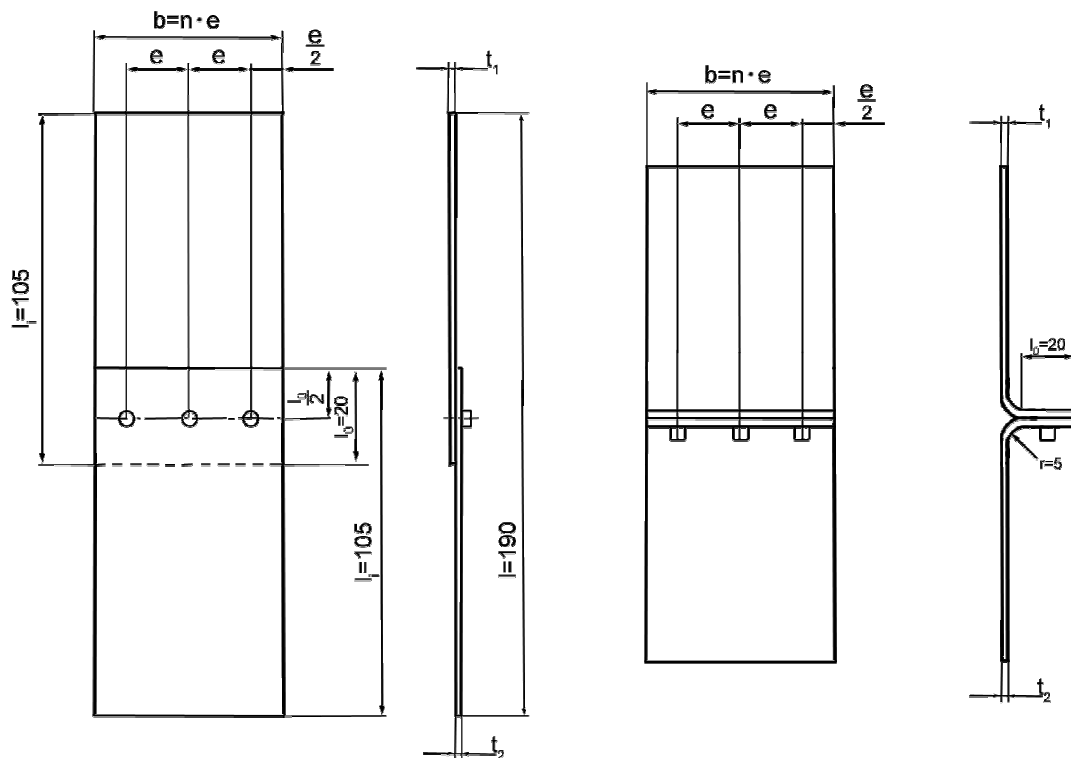


Abb. 4.1: Skizzen der Probenbleche; links: Scherzug, rechts: Schälzug

Als Beispiel für die Breite einer 4-Punktprobe mit Punktabstand $e=45\text{mm}$:

$$e = 45\text{mm}$$

$$n = 4$$

$$b = n \cdot e$$

$$b = 45 \cdot 4 = 180\text{mm}$$

→ Zuschnittmaß der Probe: 105mm x 180mm

Abb. 4.2 zeigt eine solche gefügte Scherzugprobe. $t_1=t_2=1,5\text{mm}$

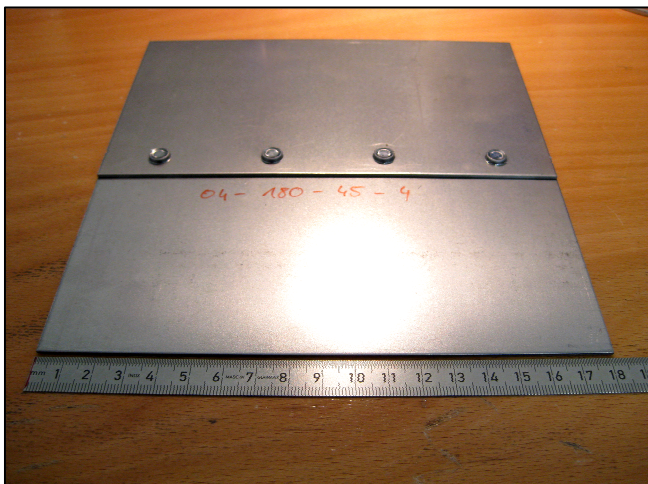


Abb. 4.2: gefügte Scherzugprobe der Versuchsreihe 1,5/1,5; $e = 45$, $n = 4$

Eine Übergangsform stellt der 45°-Schrägzugversuch dar, der für diese Arbeit entwickelt wurde um den Übergang zwischen Scherzug (0°) und Schälzug(90°) zu untersuchen. Die Spannvorrichtung für die Probenbleche wurde so entwickelt, das auftretende Querkkräfte nicht an die Zugvorrichtung übertragen werden. Durch die außermittige Anordnung der Probenbleche, auf Grund des 45° Winkels, wären diese auf die Zugvorrichtung übertragen worden. Das hätte die Resultate verfälschen, Außerdem hätte das einen Schaden an der Zugvorrichtung hervorrufen können. Die Querkraftaufnehmer(siehe Abb. 4.3) sind aus 10mm Stahlblech gefertigt. Sie gewährleisten die auftretenden Querkkräfte nicht in die Zugvorrichtung geleitet werden. Die Bleche sind durch 4 Schrauben (M8) während des Zugversuches fixiert, was das seitliche Ausweichen der 45°-Spannbacken verhindert. Die Schrauben werden nur leicht angezogen. Durch gute Schmierung der Querkraftaufnehmer mit einem niedrigviskosen Öl kann so die Reibung zwischen Querkraftaufnehmer und Probenhalter minimiert werden. Durch einen Testversuch ohne Probeblech, jedoch mit montierten Querkraftaufnehmern konnte sichergestellt werden, dass der Reibungseinfluss auf das Versuchsergebnis keinen nennenswerten Einfluss hat. Da der Probenhalter für 45°-Schrägzugproben nur 60mm breit ist, konnten nicht alle Zugversuche durchgeführt werden die dem Umfang einer Versuchsreihe entsprechen.

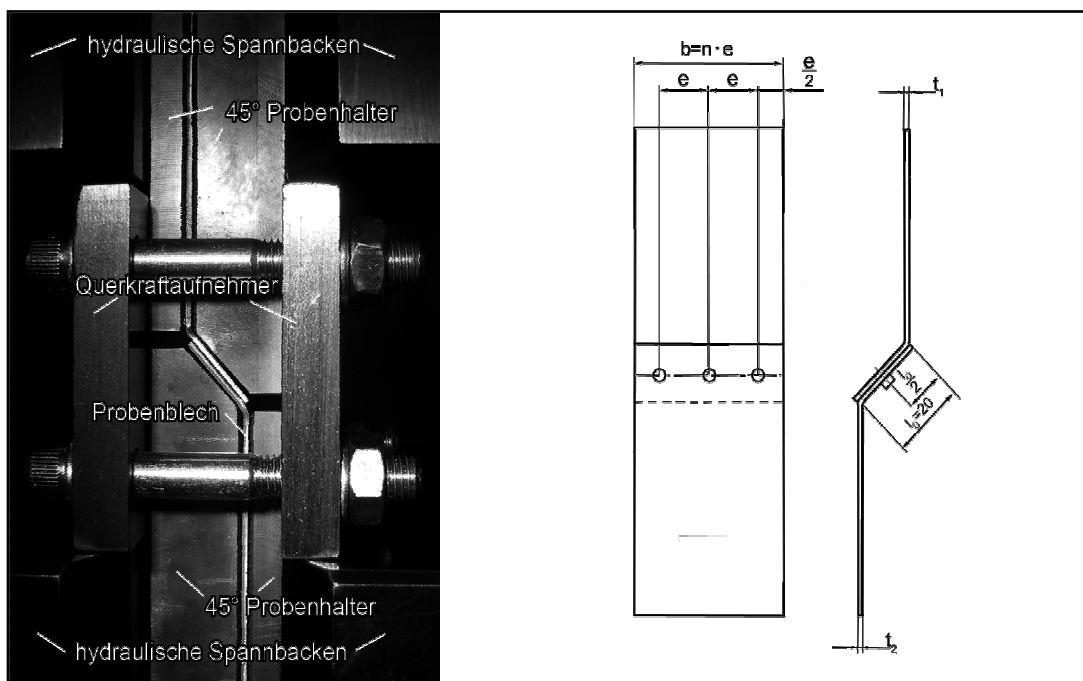


Abb. 4.3: links: 45°-Probenhalter/Spannbacken mit Probenblech und Querkraftaufnehmer im eingebauten Zustand; rechts: Probengeometrie 45°-Schrägzugprobe

4.1.3 Zuschnitt

Die Bleche wurden mit einer elektromotorisch betriebenen Tafelschere der Firma *Stückmann & Hillen* mit manuell einstellbarem Anschlag zugeschnitten. Es wurden für alle Versuche und alle gefügten Versuchsreihen mindestens 3000 Probenbleche zugeschnitten. Alle Zugproben wurden in der gleichen Blechrichtung zugeschnitten, daher kann von einem Einfluss der Beanspruchungsrichtung des Bleches auf die Höchstzugkraft abgesehen werden.

4.2 Fügen

Alle Probenbleche wurden mit der hydraulischen Kraft- bzw. Weggesteuerten Presse *ProMess-320* gefügt. Für diese Fügeversuche wurde allerdings nur die Kraftsteuerung eingesetzt, welche mit der Software *UfM* der Firma *ProMess* gesteuert wurde. Zum Fügen kamen ausschließlich Stempel und Matrizen der Firma *TOX* zum Einsatz. Abb. 4.4 zeigt einen Stempel und eine Matrize der Firma *TOX*[®].



Abb. 4.4: Werkzeuge (Stempel und Matrize) *TOX*[®]

Die Presse kann eine maximale Fügekraft von 100kN aufbringen und ist somit für diese Fügeversuche bis maximal 60kN bestens geeignet. Abb. 4.5 zeigt die Presse *Promess-320* mit Probenblechhalterung während einer Fügung. Nach dem Fügen wurden die gefügten Bleche jeweils mit einer eindeutigen Kennung versehen, was die spätere Analyse erleichtert und den erzielten Höchstzugwert genau der entsprechenden Zugproben zuordnen lässt.



Abb. 4.5: *Promess-320 mit Fügevorrichtung, beim Fügevorgang*

Die gefügten Schälzugproben werden nach dem Fügen in einer Schraubstockähnlichen Vorrichtung[Abb. 4.7] mit einem definierten oberen Radius von $r = 5\text{mm}$ so eingespannt, dass die gefügten Clinchverbindungen nicht beeinflusst werden. Das ist möglich weil die Spannbacken im Bereich der Fügepunkte eine Aussparung besitzen, die Probenbleche also nur oberhalb und unterhalb des Fügebereichs gespannt werden um die Fügepunkte nicht in ihrer Festigkeit zu beeinflussen. Die Fügeprobe wird auf einen Winkel von 180° aufgebogen. Das Aufbiegen der Proben erfolgt anfangs manuell, da eine geringe Aufbiegung zur weiteren Bearbeitung mittels einer Presse vorhanden sein muss. Das endgültige Aufbiegen der Bleche auf je 90° erfolgte entweder manuell mit der *Balance Druck Presse YB-1*, oder wenn dies nicht mehr ausreichte mit der hydraulischen Presse, die auch zum Fügen genutzt wurde, *ProMess-320*.

Die Scherzugproben können nach dem Fügen direkt auf ihre statische Festigkeit durch Zugprüfung untersucht werden. Die Schälzugproben müssen allerdings erst noch aufgebogen werden, da wie in Abb. 4.6 ersichtlich, die Probenbleche direkt übereinander gefügt wurden um einen Schälzug zu ermöglichen. Das Aufbiegen erfolgt deshalb nach dem Fügen, weil die Fügevorrichtung, die das genaue und reproduzierbare Fügen ermöglicht, nur zum Fügen flacher Proben konstruiert wurde. Außerdem wäre es rein technisch nicht möglich, da die hohen Aufkantungen der Schälzugproben den Werkzeugen bzw. Werkzeughalten im Weg sind und somit eine ordentliche Fügung nicht möglich wäre. Eine aufgebogene Schälzugprobe ist in Abb. 4.8 dargestellt. Die Vorrichtung zum Aufbiegen findet sich in Abb. 4.7.



Abb. 4.6: Gefügte 4 Punkt Schälzugprobe, Versuchsreihe 1,5/1,5, $e = 45$; $n = 4$

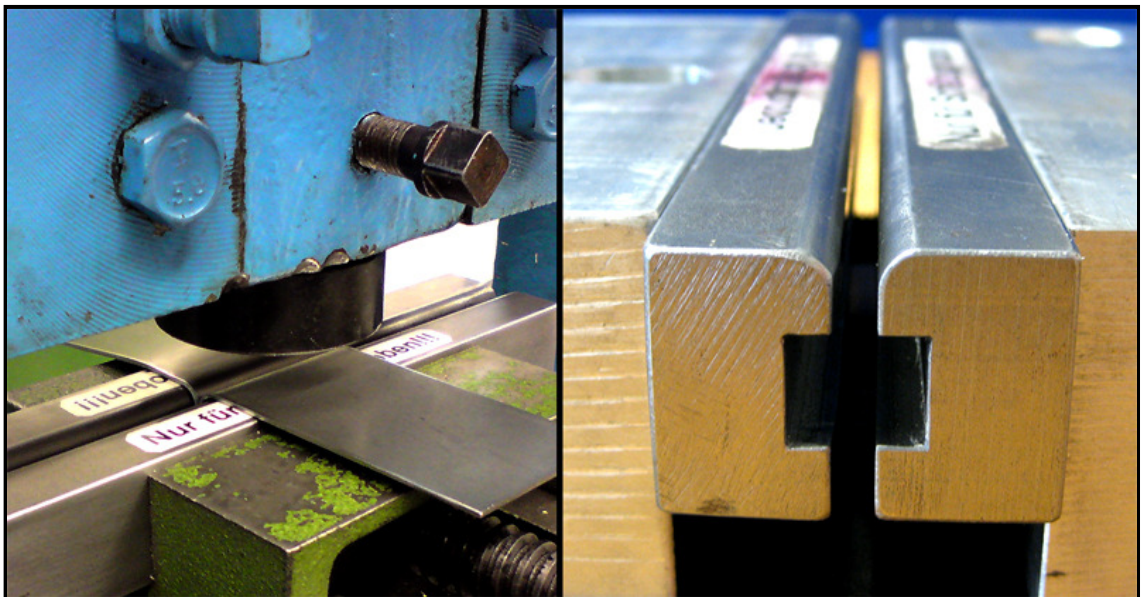


Abb. 4.7: Spannbacken für Schälzugproben; links: in Standard-Schraubstock unter Balance-Presse; rechts: in Spezial-Halterung für dicke Bleche mit hydraulischer Presse

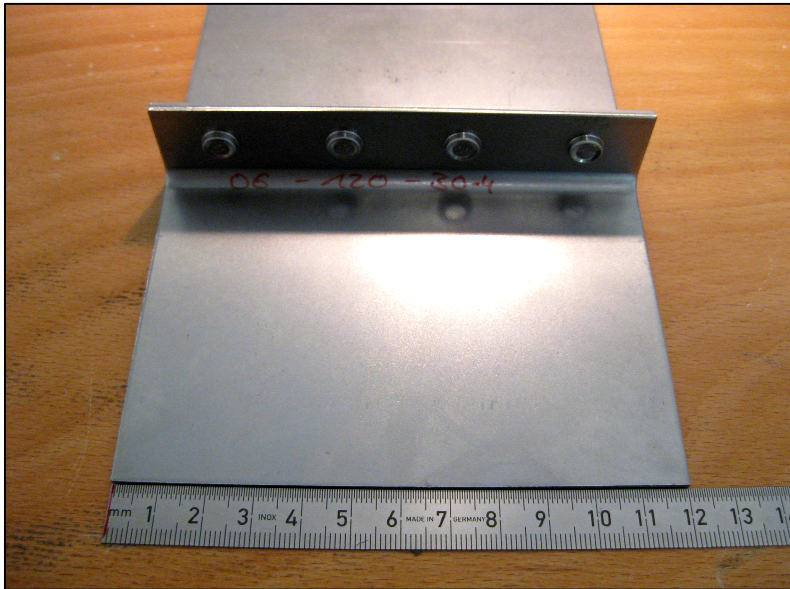


Abb. 4.8: 4-Punkt Schälzugprobe, gefügt und aufgebogen, Versuchsreihe 1,5/1,5, $e = 30$; $n = 4$

4.3 Ermitteln der Fügeparameter der TOX-Werkzeuge

Um das reproduzierbare Fügen der Probenbleche vornehmen zu können sind Kenntnisse der zu erreichenden Bodendicke oder der richtigen Fügekraft notwendig. Meist wird allerdings die Bodendicke angegeben. Sie ist leicht überprüfbar und sichert zudem werkstoffunabhängig eine sichere Verbindung. Da allerdings keine der Angaben vorlagen mussten die optimalen Fügeparameter experimentell ermittelt werden.

Empfehlungen von TOX®

Die Empfehlungen lag nur für die Angaben der passenden Stempel und Matrizen für die jeweiligen Blechkombinationen vor. Diese Angaben sind wichtig um gute Verbindungen herstellen zu können. Als entscheidendes Kriterium fehlte die Angabe der optimalen Bodendicke. Die Werkzeugempfehlung sind in Tab. 4.1 dargestellt.

Blechkombination t_1 / t_2	TOX® d_M	Stempel TOX-SAP-Nr.	Matrize TOX-SAP-Nr.
0,75 / 0,75	8,0	175285	258064
1,5 / 1,5	8,0	156547	258089
0,75 / 1,5	8,0	154501	258094
1,5 / 0,75	8,0	154501	258089
2,5 / 2,5	10,0	160627	258233
1,25 / 2,5	10,0	160627	276651

Tab. 4.1: Clinch-Werkzeugempfehlung der Fa. TOX®

Optimieren der Clinchverbindungen

Vorbemerkung:

Alle Zugproben wurden kraftgesteuert gefügt (Fügen bis zum Erreichen einer vorher eingestellten Maximalkraft). Daher wird im folgenden Abschnitt auch immer wieder die Fügekraft erwähnt und deren Abhängigkeiten von der Höchstzugkraft untersucht.

Um die zu erreichende Bodendicke zu ermitteln wurden zunächst mit den empfohlenen Werkzeugen Einpunkt-Fügeproben mit unterschiedlich großen Fügekräften angefertigt. Nach dem Fügen wurden die Proben mittels STRUERS Discotom-5 [Abb. 4.9] mittig der Clinchverbindung getrennt.



Abb. 4.9: *STRUERS Discotom-5: wassergekühlter Trennschleifer; U/min: 2850*

Die getrennten Proben werden anschließend warm eingebettet (durch STRUERS ProntoPress-10 [Abb. 4.10]). Dabei wird die Probe mit feinem Kunststoffgranulat durch Druck und Temperatur in 40mm Formen eingebettet. Der Kunststoff wird bei diesem Vorgang transparent.

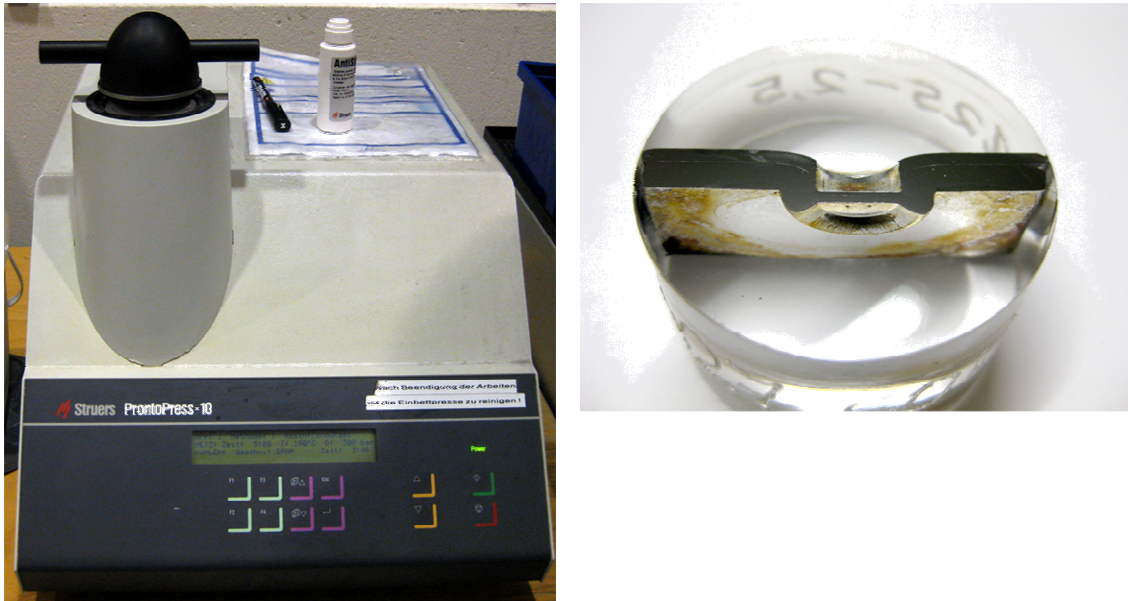


Abb. 4.10: Links: STRUERS ProntoPress-10: Warmeinbetten in transparenten Kunststoff in 40mm Formen; Rechts: eingebettete Clinchprobe

Mechanische Präparation

Die metallgraphische Vorbehandlung wurde mit der kombinierten Schleif- und Poliermaschine in Abb. 4.11 mit der nachfolgenden Methode präpariert.

Vorgang	Unterlage	Körnung / Korngröße	UpM	Kraft [N]	Zeit [min.sek]	Drehrichtung Probenhalter	Schmiermittel / Kühlmittel
Schleifen	SIC-Papier	300	300	20	5,00	gegenläufig	Wasser
Schleifen	SIC-Papier	600	300	20	3,00	gegenläufig	Wasser
Schleifen	SIC-Papier	800	300	10	2,30	gegenläufig	Wasser
Polieren	SWNG-Plus	3 μ	150	20	5,00	gegenläufig	DP-Lubricant green

Tab. 4.2: Reihenfolge der metallographischen Behandlung

Dabei werden beim Wechsel der Korngrößen die Proben immer wieder durch eines Mikroskops mittels Sichtprüfung auf die Gleichmäßigkeit des Schliffbildes überprüft. Bei Bedarf wurde nachgeschliffen. Das war nötig, da sich durch unterschiedliche Blechdicken und Kombinationen leicht abweichende Schleifzeiten ergaben.



Abb. 4.11: STRUERS RotoPol-22/RotoForce-4: wassergekühlte Schleif-/Poliermaschine mit 2 Arbeitstellern (rechts schleifen, links polieren)

Mikroskopie

Nach dem Schleifen und Polieren konnten die Proben mikroskopisch vermessen werden. Dies geschah digital mit dem Programm NIS-Elements. Das Bild wurde von der am Mikroskop verbauten Kamera Nikon DXM1200 aufgenommen. Die Proben wurden hinsichtlich Halsdicke, Hinterschnitt und Bodendicke vermessen.



Abb. 4.12: Arbeitsplatz Mikroskopie

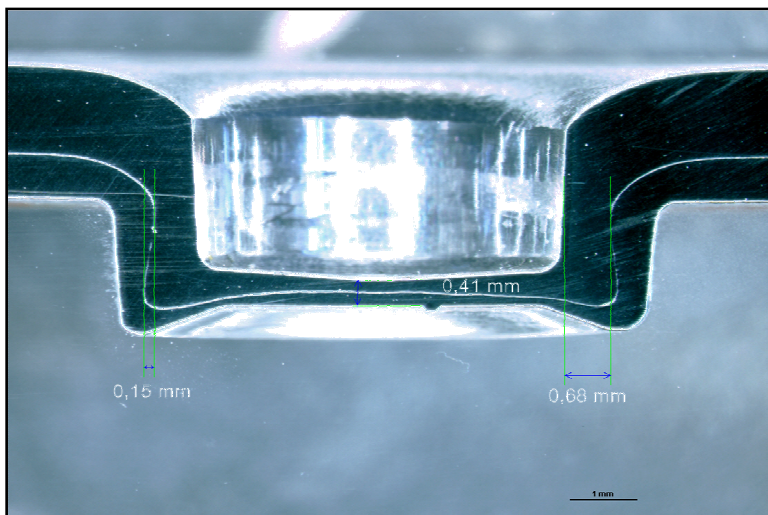


Abb. 4.13: Vermessene Probe der Versuchsreihe 1,5/0,75

Von TOX lag die Information vor, das ein optimales Verhältnis von Hinterschnitt/Halsdicke so groß wie möglich sein sollte. Um dieser Aussage nach zu gehen wurden Scherzugproben mit unterschiedlichen Kräften gefügt und die Festigkeit im Zugversuch ermittelt.

Ergebnis dieser Untersuchung war, dass nicht immer der höchste Wert „Hi/Ha“ die optimale Festigkeit liefert, sondern das der optimale Wert durch Zugversuche experimentell ermittelt werden muss. Es wurden je Fügekraft mindestens 3 Zugproben angefertigt.

Im folgenden Beispiel ist der Verlauf der Kraft, sowie des Hinterschnittes für verschiedene Fügekräfte der Versuchsreihe 1,5/1,5 dargestellt.

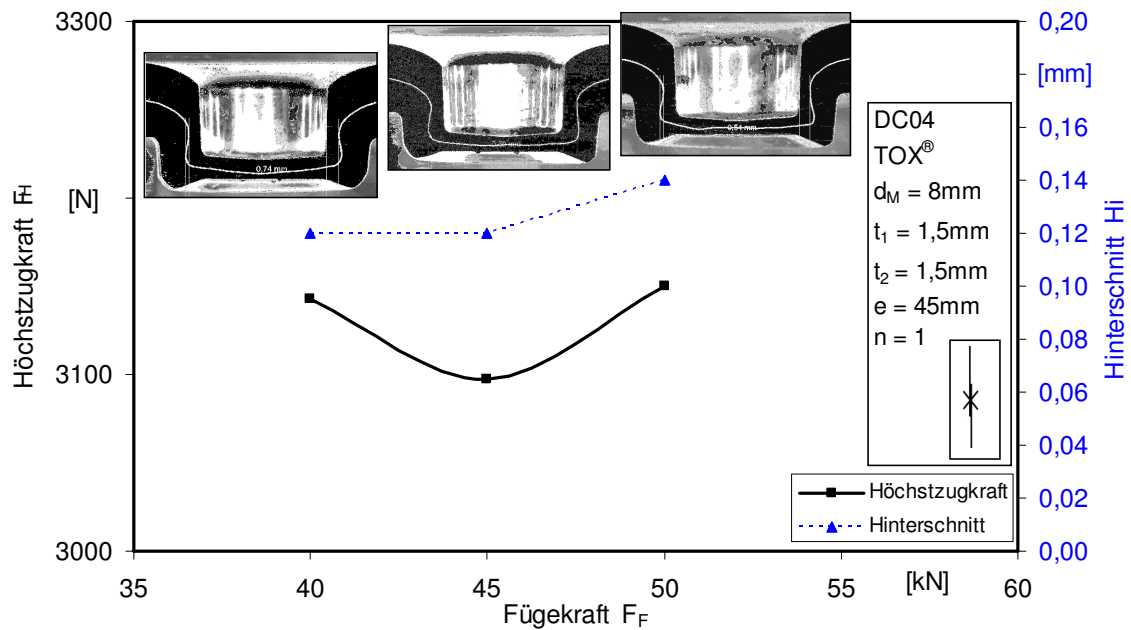


Abb. 4.14: Höchstzugkraft und Hinterschnitt abhängig der Fügekraft, für Versuchsreihe 1,5/1,5

Wie Abb. 4.15 zeigt sind die Unterschiede der Höchstzugkräfte zwischen den einzelnen Fügekräften gering und fallen zudem für die gleiche Fügekraft mit relativ großer Abweichung voneinander auf. Auf dieses Phänomen soll später noch eingegangen werden (siehe Abschnitt 6.1.1). Für die Versuchsreihe 1,5/1,5 wurden die 50kN als Fügekraft gewählt, da die Höchstzugkräfte tendenziell am größten sind.

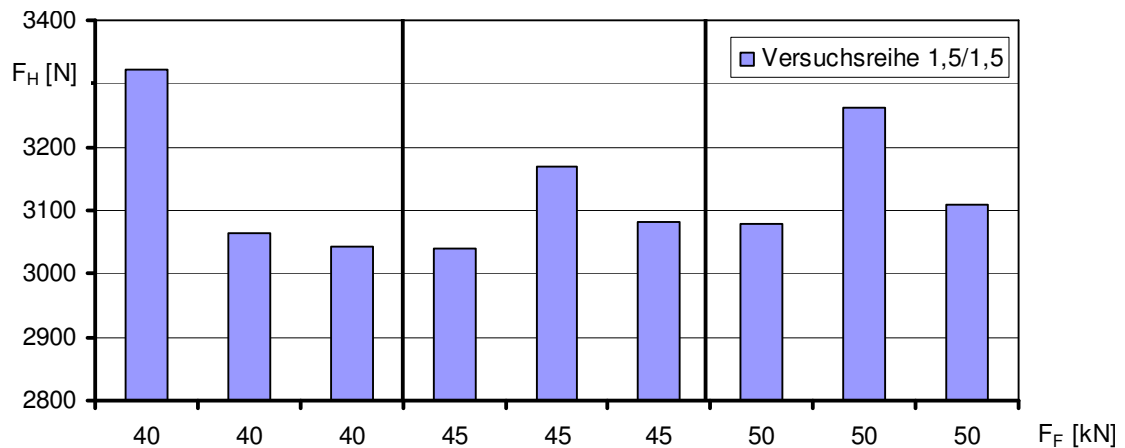


Abb. 4.15: Höchstzugkräfte für verschiedene Fügekräfte der Versuchsreihe 1,5/1,5

4.4 Festigkeitsprüfung - Zugversuch

Die Höchstzugkräfte der 1-Punkt-, 2-Punkt-, 3-Punkt-, und 4-Punkt-Verbindungen wurden durch den Standard-Zugversuch bestimmt. Die Zuggeschwindigkeit lag bei ($v = 10 \text{ mm/min}$). Das Abbruchkriterium für den Zugversuch lag bei 80% Kraftverlust der höchsten Zugkraft des jeweiligen zugversuches. Verwendet wurde die Universalzugprüfmaschine *INSPEKT desk 50kN* der Firm *Hegewald & Peschke Messmittel und Prüftechnik GmbH*. Die Höchstzugkraft beträgt 50kN, was für diese Zugversuche ausreichend ist. Der Weg wird intern über den Traversenweg bestimmt und die Kraft über die eingebaute Kraftmessdose. Angesteuert und verwaltet wird die Zugprüfmaschine mit der Software *LabMaster*. Abb. 4.16 zeigt ein Bild der Zugprüfmaschine und den Arbeitsplatz.

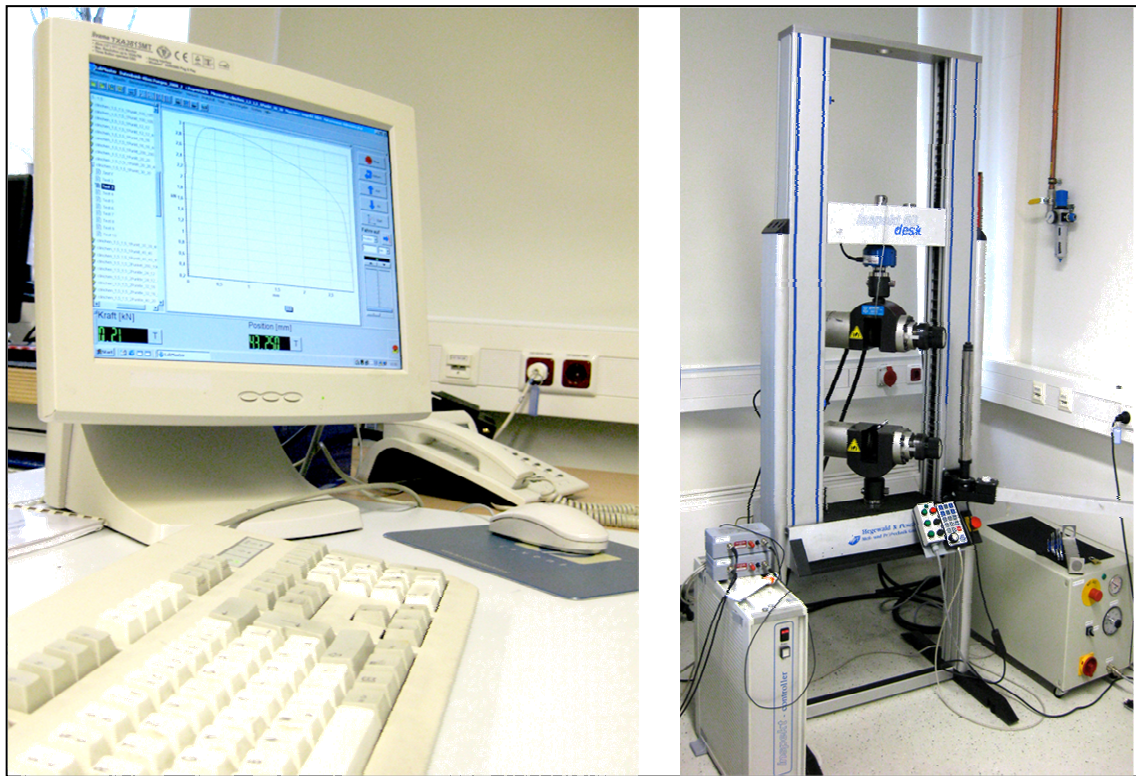


Abb. 4.16: Links: Arbeitsplatz Zugprüfmaschine; Rechts: Standard-Zugprüfmaschine Inspekt 50 desk, Hegewald & Peschke

Da die Breite der hydraulischen Spannbacken der Zugmaschine auf 55mm begrenzt ist, war es notwendig einen Adapter zu entwickeln um die breiteren Zugproben ($b \geq 55 \text{ mm}$) prüfen zu können. Dieser Adapter musste händisch gespannt werden und ist in Abb. 4.17 dargestellt.

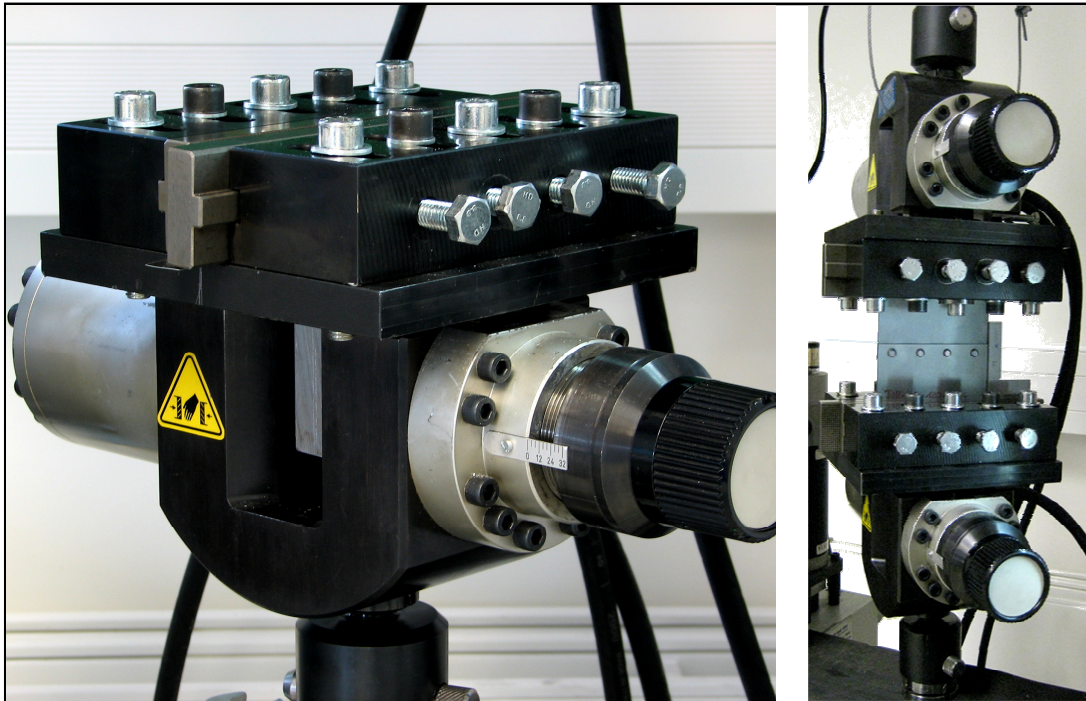


Abb. 4.17: Links: untere, hydraulische Spannbacken mit Adapterspannbacke;
Rechts: große Adapterspannbacken, eingebaut mit 4-Punkt Zugprobe

Durch die Zugprüfung werden die Höchstzugkräfte ermittelt, welche die Ausgangsdaten zur Erstellung der Festigkeitseigenschaftsgitter für Clinchverbindungen sind. Wie in Abb. 4.18 dargestellt, wurden die Höchstzugkräfte jeweils einer Versuchsreihe in ein Gitter übertragen, wodurch beispielsweise der lineare Zusammenhänge zwischen Punkanzahl und Höchstzugkraft der Zugproben konstanter Punktabstände unmittelbar ersichtlich ist.

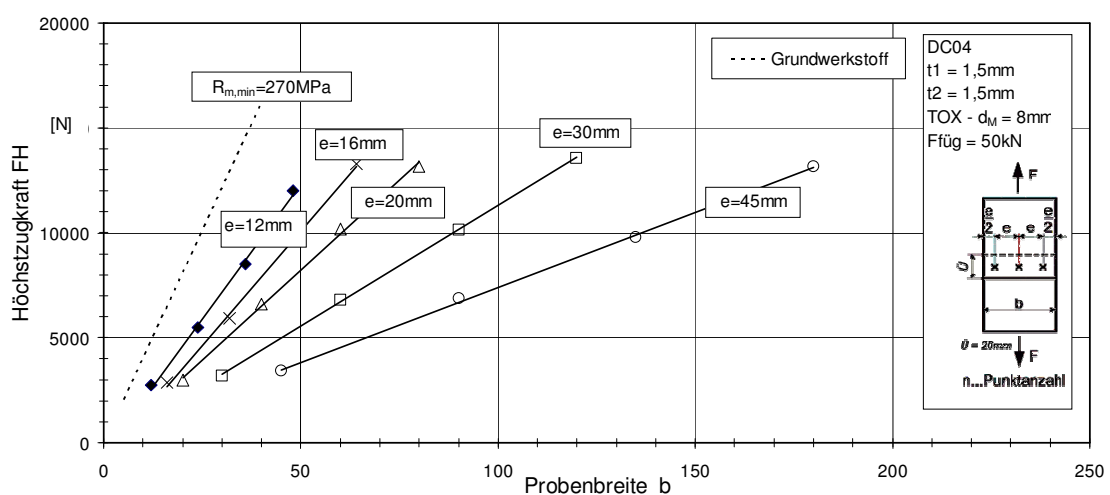


Abb. 4.18: Höchstzugkräfte über Probenbreite für Versuchsreihe 1,5/1,5

5 Versuchsergebnisse

5.1 Ergebnisse aus dem Zugversuch

Die Ergebnisse der Höchstzugkräfte aus dem Zugversuch wurden in Tabellen übertragen. Als Beispiel ist folgend eine solche Tabelle der Versuchsreihe 1,5/1,5 abgebildet. Die angegebenen Höchstzugwerte wurden unter Scherzugbeanspruchung gemessen.

Anzahl [n]	1					2				
e [mm]	12	16	20	30	45	12	16	20	30	45
b [mm] (= n*e)	12	16	20	30	45	24	32	40	60	90
F1, max [N]	2803,1	2919,4	3057,4	3099,6	3278,6	5367,3	6409,0	6572,2	6587,2	6620,4
F2, max [N]	2636,5	2787,0	3000,1	3310,0	3468,7	5475,3	5831,7	6643,3	6881,1	7083,2
F3, max [N]	2661,9	2798,5	3018,6	3017,9	3414,7	5429,6	6083,2	6890,6	6718,7	7114,2
F4, max [N]	2755,1	2897,7	2942,0	3322,0	3505,2	5439,3	5859,9	6203,1	6836,4	6889,0
F5, max [N]	2805,4	2894,0	2989,5	3122,2	3335,4	5763,7	5453,3	6605,9	7070,3	6683,6
F _{H,mittel} [N]	2732	2859	3002	3174	3400	5495	5927	6583	6819	6878
R _{m,Naht} [N/mm ²]	151,8	119,1	100,1	70,5	50,4	152,6	123,5	109,7	75,8	50,9
Standardabw. [N]	66,6	53,3	29,2	113,3	74,8	107,5	254,9	156,3	132,6	180,8
Verbindungswertigkeit	0,49	0,38	0,32	0,23	0,16	0,49	0,40	0,35	0,24	0,16

Anzahl [n]	3					4				
e [mm]	12	16	20	30	45	12	16	20	30	45
b [mm] (= n*e)	36	48	60	90	135	48	64	80	120	180
F1, max [N]	8579,0	10123,0	10790,0	10181,1	9764,4	12224,6	13259,8	13879,5	13495,2	13161,0
F2, max [N]	8746,1	10068,5	9745,7	10391,9	9822,5	12219,1	12637,3	12720,4	13178,2	12979,7
F3, max [N]	8326,2	9909,3	10293,9	9897,3	9945,3	11367,8	13848,1	12387,7	13522,5	13188,2
F4, max [N]	8478,0	8726,2	9631,8	10494,4	9739,4	12238,0	13603,1	13176,3	13911,9	13410,7
F5, max [N]	8337,3	9351,0	10458,2	9634,2	9608,9	11956,1	13108,0	13675,1	13783,7	13126,4
F _{H,mittel} [N]	8493	9636	10184	10120	9776	12001	13291	13168	13578	13173
R _{m,Naht} [N/mm ²]	157,3	133,8	113,2	75,0	48,3	166,7	138,5	109,7	75,4	48,8
Standardabw. [N]	135,4	477,6	396,1	283,2	86,2	271,4	347,5	491,0	215,6	101,0
Verbindungswertigkeit	0,50	0,43	0,36	0,24	0,15	0,53	0,44	0,35	0,24	0,16

Tab. 5.1: *Ergebnistabelle der Höchstzugwerte unter Scherzugbeanspruchung der Versuchsreihe 1,5/1,5*

In Abb. 5.1 sind die Mittelwerte der Höchstzugkräfte der Versuchsreihe 1,5/1,5 unter Scherzugbeanspruchung dargestellt. Hier kann man bereits den direkten Zusammenhang zwischen Höchstzugkraft und Punktzahl bei konstantem Punktabstand erkennen.

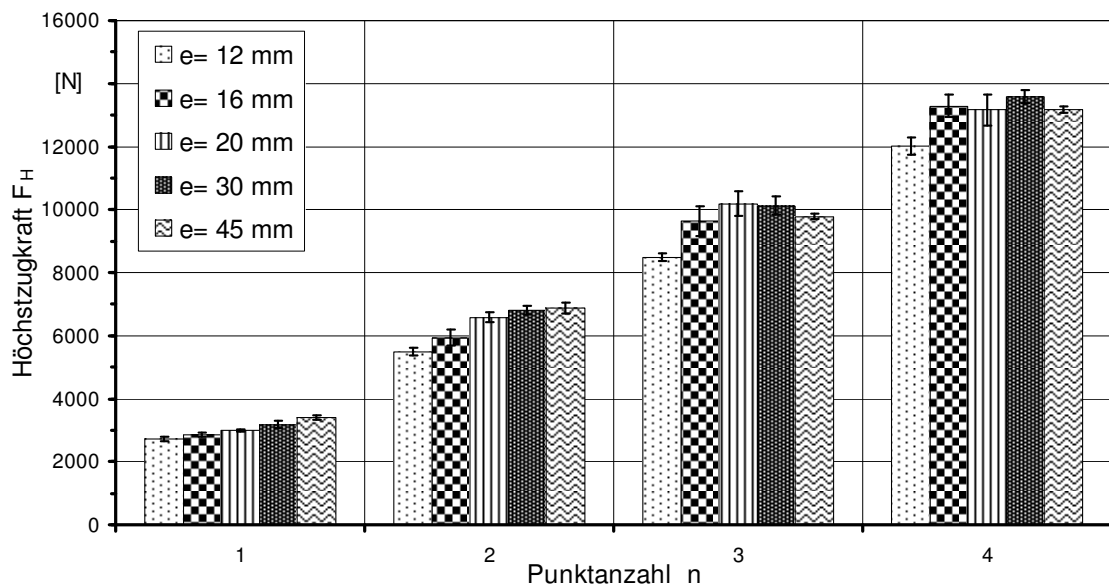


Abb. 5.1: *Höchstzugkräfte mit Standardabweichung unter Scherzugbeanspruchung für Versuchsreihe 1,5/1,5*

In Abb. 5.2 sind für die Blechkombinationen 0,75/0,75; 1,5/1,5 und 2,5/2,5 die Höchstzugkräfte je Verbindungspunkt dargestellt. Die Werte im Diagramm ergeben sich aus den normierten⁴ Höchstzugkräften für $n=1$; 2; 3 und 4. Bei dieser Methode werden alle Messpunkte berücksichtigt, allerdings werden dabei auch alle Ungenauigkeiten berücksichtigt, die von den Mittelwerten der Messpunkte beinhaltet werden. Folgende Grafik dient der Veranschaulichung der Höchstzugwerte im direkten Vergleich für unterschiedliche Blechdicken. Die gestrichelten, horizontalen Geraden, die ab $e=16\text{ mm}$ jeweils durch die minimalen Wertepunkte der farbigen Kurven verlaufen, stellen einen Vorschlag für die Wertung der Kurven dar. Nämlich das sich im untersuchten Bereich, abgesehen vom Anfangsbereich bis $e=16\text{ mm}$, keine konkrete Monotonie einstellt. Vielmehr weisen die Messpunkte die Charakteristik einer Streuung um einen konstanten Höchstzugwert auf. Diese zugehörige Streuung lässt sich zwar für den untersuchten Bereich bis $e=45\text{ mm}$ bestimmen, basiert aber nur auf einen Stichprobenumfang von $n=5$. Den weiteren Verlauf für $e>45\text{ mm}$ kann man nur anhand der vorhandenen Werte abschätzen.

⁴ normiert über die Punktzahl

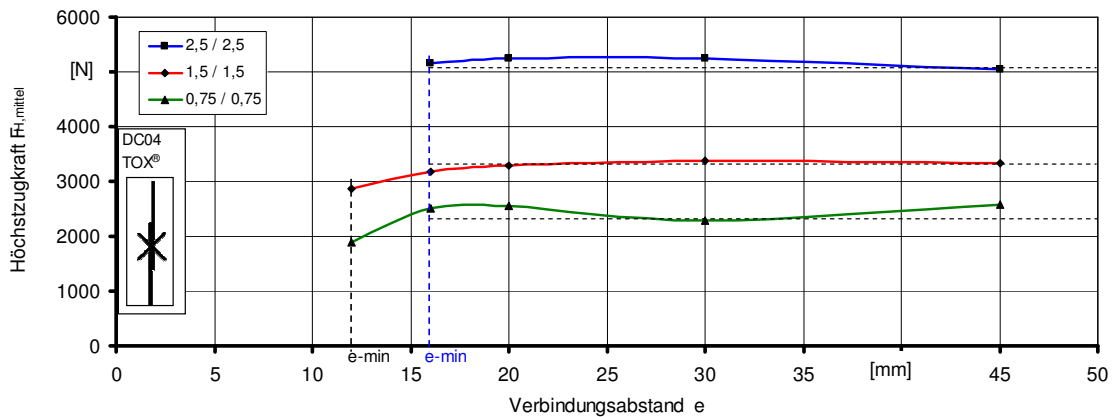


Abb. 5.2: Höchstzugkräfte für verschiedene Punktabstände unter Scherzugbeanspruchung für Versuchsreihe 0,75/0,75; 1,5/1,5; 2,5/2,5

Unter Schälzugbeanspruchung kann man die Beobachtung machen, dass die Höchstzugkräfte für $e > 16 \text{ mm}$ für die Blechdicken 1,5 mm und 2,5 mm ansteigen. Für 0,75 mm Blech fallen die Höchstzugkraft mit zunehmendem Punktabstand ab. Eine mögliche Begründung hat sicherlich mit der Blechdicke und der gegenseitigen Beeinflussung der Fügepunkte zu tun.

Für die Blechdicke 0,75 mm wurde aus diesem Grund eine gestrichelte Gerade eingezeichnet. Für die beiden anderen Blechdicken lässt sich der weitere Verlauf nur erraten. Wahrscheinlich ist, dass die Höchstzugkraft nicht, oder nur unwesentlich ansteigt im Vergleich den höchsten dargestellten Werten der jeweiligen Kurve. Scheinbar beeinflussen sich die Fügepunkte bis zu einem bestimmten Punktabstand gegenseitig, dadurch, dass bei jedem Fügevorgang mechanische Spannungen in den Grundwerkstoff eingebracht werden. Denkbar wäre, dass die Fügepunkte sich somit gegenseitig ihrer Festigkeit negativ beeinflussen. Das würde erklären, warum bei kleinen Punktabständen die ertragbaren Höchstzugkräfte geringer sind.

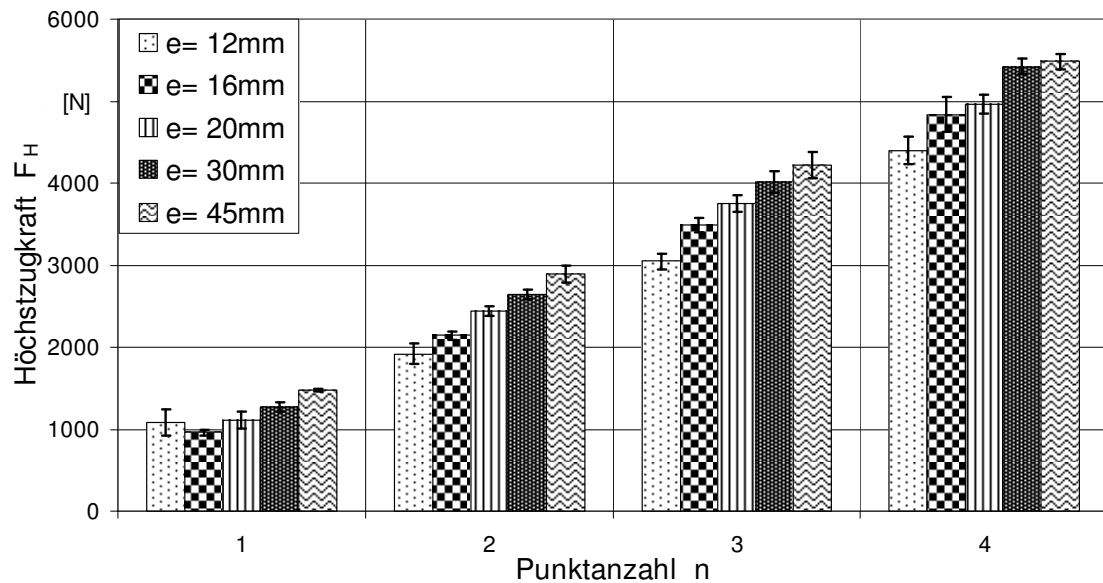


Abb. 5.3: *Höchstzugkräfte mit Standardabweichung unter Schälzugbeanspruchung, für Versuchsreihe 1,5/1,5*

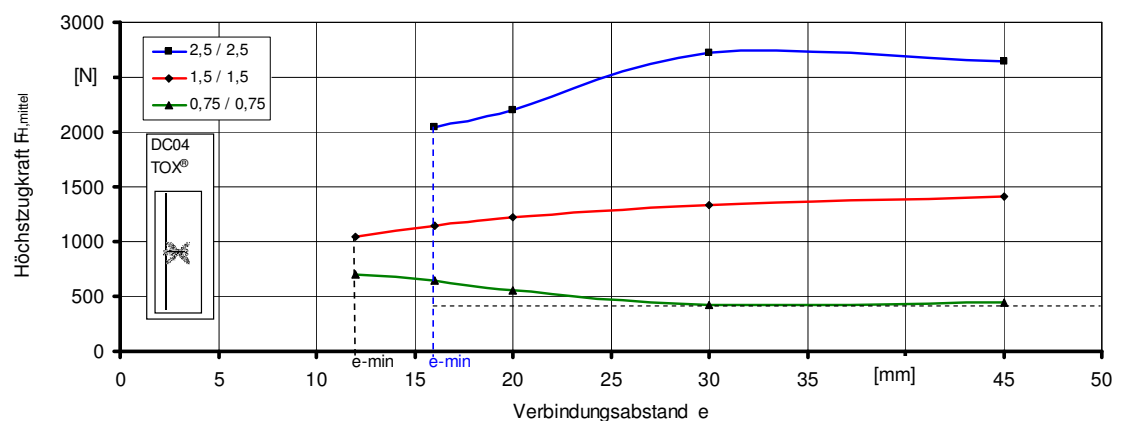


Abb. 5.4: *Höchstzugkräfte für verschiedene Punktabstände unter Schälzugbeanspruchung für Versuchsreihe 0,75/0,75; 1,5/1,5; 2,5/2,5*

5.2 Versagen / Bruchbilder

Typisch für den Scherzug (siehe Abb. 5.5) ist der relativ steil ansteigende elastische Bereich der fast eine Gerade bildet und Ähnlichkeiten mit der Hookschen-Gerade beim Zugversuch von Grundwerkstoffen hat. Allerdings besteht abgesehen von der optischen Ähnlichkeit im Diagramm kein Zusammenhang, da erwiesener Maßen im Vergleich zur Hookschen Gerade, die den elastischen Verformungsbereich (vollkommen reversibel) bei Grundwerkstoffen darstellt, diese Gerade nicht als reversibel im Sinne der Verformung angesehen werden kann (nur minimal im Anfangsbereich). Dies zeigt

ten verschiedene Untersuchungen zu Eigenschaften von Clinchverbindungen. Der höchste Punkt der Kurve stellt die Zugfestigkeit dar. Danach fällt die Kurve mit stärker zunehmender Verformung ab bis sie an einem Punkt stoppt an dem das Abbruchkriterium des Zugversuches definiert wurde. Dieses liegt bei 80% Kraftverlust der Zugfestigkeit. Clinchverbindungen können unter Scherzugbeanspruchung generell mehr Kraft übertragen als vergleichsweise im Schälzug, daher ist diese Beanspruchungsrichtung vorzuziehen. In Abb. 5.6 ist das kombinierte Versagen aus Abscherbeanspruchung mit anschließendem Ausknöpfen zu sehen.

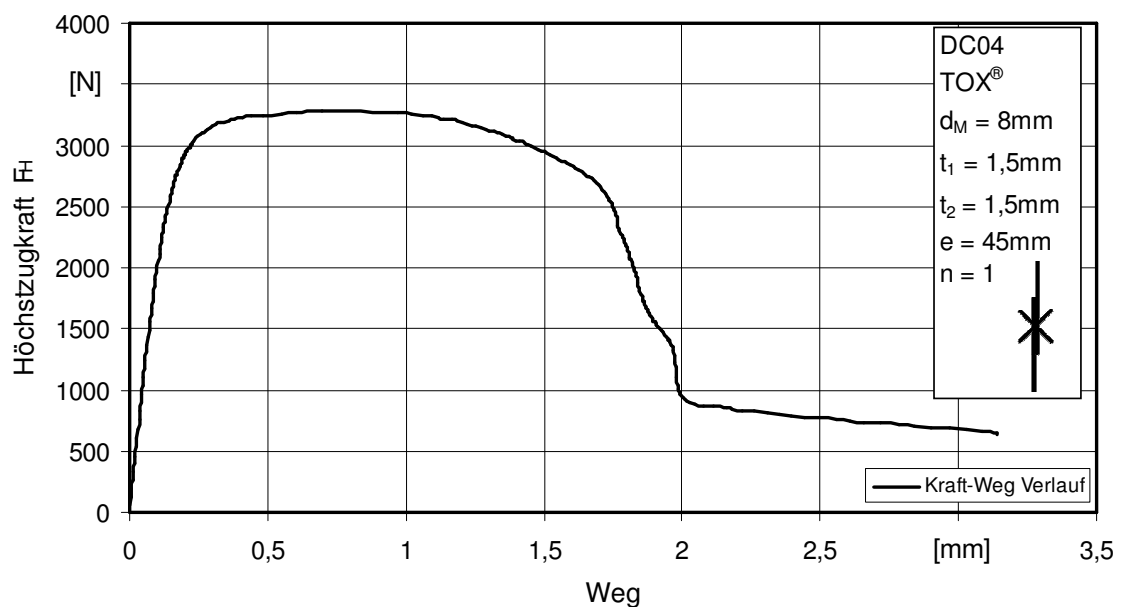


Abb. 5.5: Kraft-Weg-Verlauf eines Scherzugversuchs der Versuchsreihe 1,5/1,5

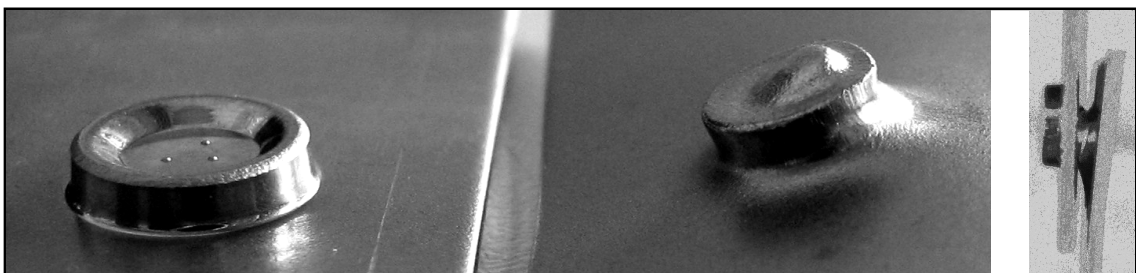


Abb. 5.6: Versagen einer Scherzugprobe mit kombiniertem Versagensbild (starke Verformung des Fügepunktes → leichter Anriss → anschließend Ausknöpfen); Einpunktprobe Versuchsreihe 1,5/1,5

Im Vergleich zum Scherzug ist der Anstieg bis zur Zugfestigkeit wesentlich geringer und der Weg bis zum versagen wesentlich höher. Dies ist wohl vor Allem der Geometrie der Schälzugproben geschuldet. Denn wenn die Verbindung mehr Kraft übertragen kann als das Blech an Steifigkeit besitzt, wird erst ein Teil der dargestellten Bruchenergie (Fläche unter der Kurve) für die Verformung der abgekanteten Probenbleche benö-

tigt. Auch hier ist am höchsten Punkt der Kurve wieder die Zugfestigkeit zu finden. Die Kurve fällt schneller ab als beim Scherzug und endet mit dem Ausknöpfen der Clinchverbindung. In Abb. 5.8 ist das Versagen durch Ausknöpfen zu sehen, wie es bei Beanspruchung auf Schälzug typisch ist.

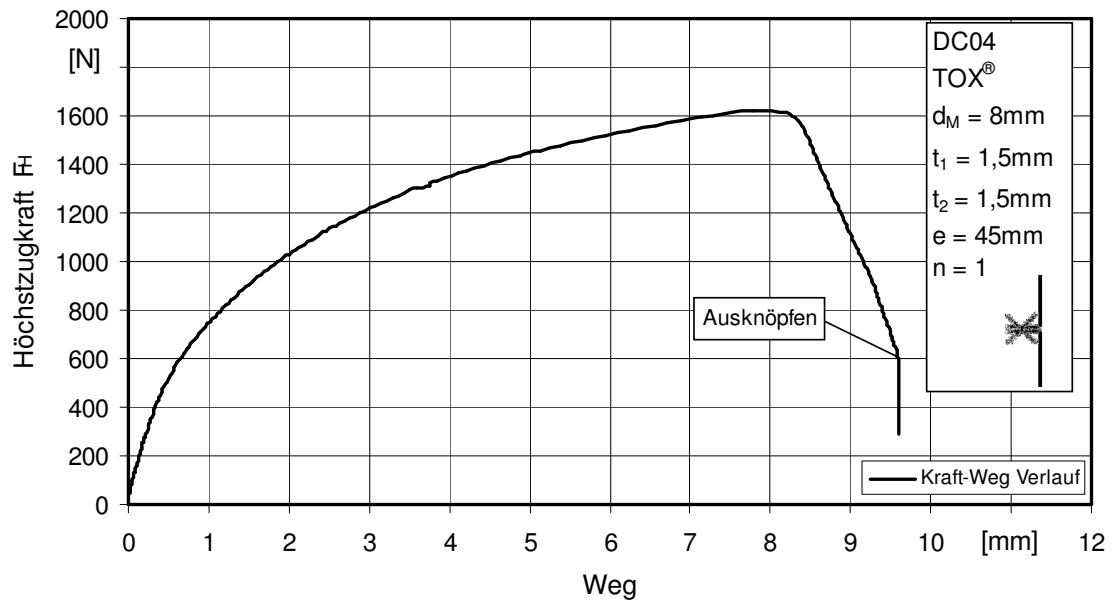


Abb. 5.7: Kraft-Weg-Kurve einer Schälzugbeanspruchung der Versuchsreihe 1,5/1,5

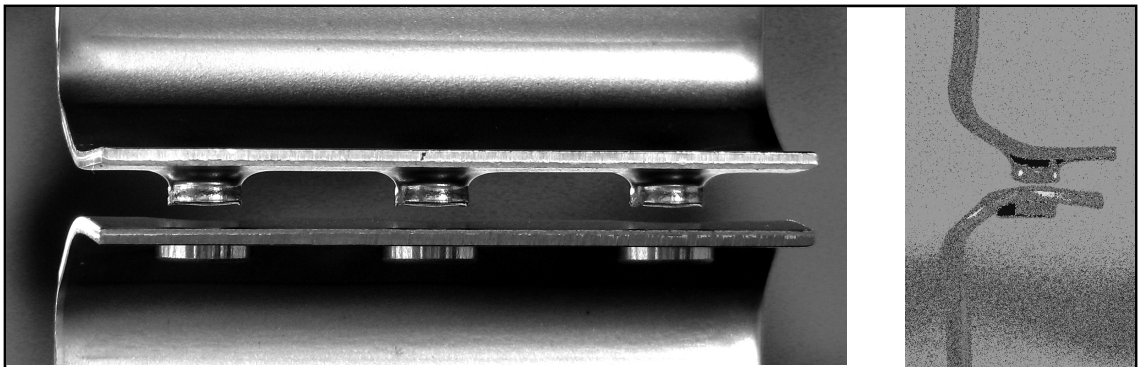


Abb. 5.8: Versagen(Ausknöpfen) unter Schälzugbeanspruchung einer Dreipunktprobe, Versuchsreihe 1,5/1,5

6 Versuchsauswertungen

6.1 Auswertung hinsichtlich der Höchstzugkraft

Unter diesem Gesichtspunkt sollen Zusammenhänge der verschiedenen Messreihen allgemein dargestellt werden. Die Auswertungen beziehen sich alle direkt auf die erreichte Höchstzugkraft.

6.1.1 Analyse eines Messpunktes

Alle Höchstzugkräfte unterliegen, betrachtet man einen einzelnen Messpunkt, einer gewissen Streuung. Bei ca. 50% aller ermittelten Messpunkte ist die Abweichung mindestens eines Messwertes in der Größenordnung wie in Abschnitt 6.1.4 beschrieben. Bei diesen untersuchten Proben beträgt die Abweichung ca. 13% vom Erwartungswert. Betrachtet man alle Messpunkte hinsichtlich der Abweichung der einzelnen Messwerte, so lässt sich kein Zusammenhang zu den üblichen Faktoren erkennen. Die Abweichungen scheinen absolut willkürlich aufzutreten. Eine genauere Untersuchung der Ursachen im Einzelnen ist allerdings in dieser Arbeit nicht vorgesehen.

Eine Ausnahme stellt die Versuchsreihe 2,5/2,5 im Scherzug dar. Der Grund für die Gleichmäßigkeit dieser Messwerte ist in der Versagensart zu finden. Nur bei dieser Versuchsreihe stellt sich im Scherzugversuch durchweg reines Abscheren der Clinchpunkte als Versagen ein. Es gibt nur minimale Verformungen der Probenbleche. Dadurch entsteht eine sehr gleichmäßige Höchstzugkraft für die unterschiedlichen Punktabstände bei gleich bleibender Punktzahl. Unterschiede zwischen $e=16\text{mm}$ und $e=45\text{mm}$ bezüglich der Höchstzugkraft sind bei gleicher Punktzahl kaum erkennbar.

Bei allen anderen Versuchsreihen liegt meist ein komplexes Mischversagen aus Abscheren → Verformung → Ausknöpfen bzw. reines Ausknöpfen(vor allem bei Schälzugbeanspruchung) vor.

6.1.2 Abhängigkeit der Höchstzugkraft von der Blechdicke

Allgemein ist zutreffend, dass mit zunehmender Blechdicke auch die Höchstzugkraft zunimmt, sowohl für Scherzug- als auch für Schälzugbeanspruchung.

In Abb. 6.1 und Abb. 6.2 ist die Höchstzugkraft für die Punktzahlen $n=1$; 2; 3 und 4 der Blechdicken $t=0,75\text{mm}$; $1,5\text{mm}$; $2,5\text{mm}$ dargestellt. Die abgebildeten Höchstzugkräfte sind für den Punktabstand $e=20\text{mm}$ ausgewählt. Diese Auswahl wurde getroffen, weil der Punktabstand $e=20\text{mm}$ für den optimalen Punktabstand ermittelt wurde (siehe Abschnitt 4.1.2) und weil dieser Punktabstand praktisch eine hohe Relevanz hat. Betrachtet man diesen Punktabstand fügetechnisch, liegt er nicht an der unteren, technisch realisierbaren Grenze (für diese Verbindung $e_{\min}=12\text{mm}$). Außerdem kann man davon ausgehen, dass sich ab diesem Punktabstand die Fügunkte nicht mehr gegenseitig negativ in ihrer Festigkeit beeinflussen. Das lässt sich daran erkennen, dass in den Festigkeitseigenschaftsfeldern bei Punktabständen $e>20\text{mm}$ eine eventuelle Steigerung der Höchstzugkraft vernachlässigbar gering ist. Die Höchstzugkraft kann für Punktabstände $e>20\text{mm}$ als konstant angesehen werden.

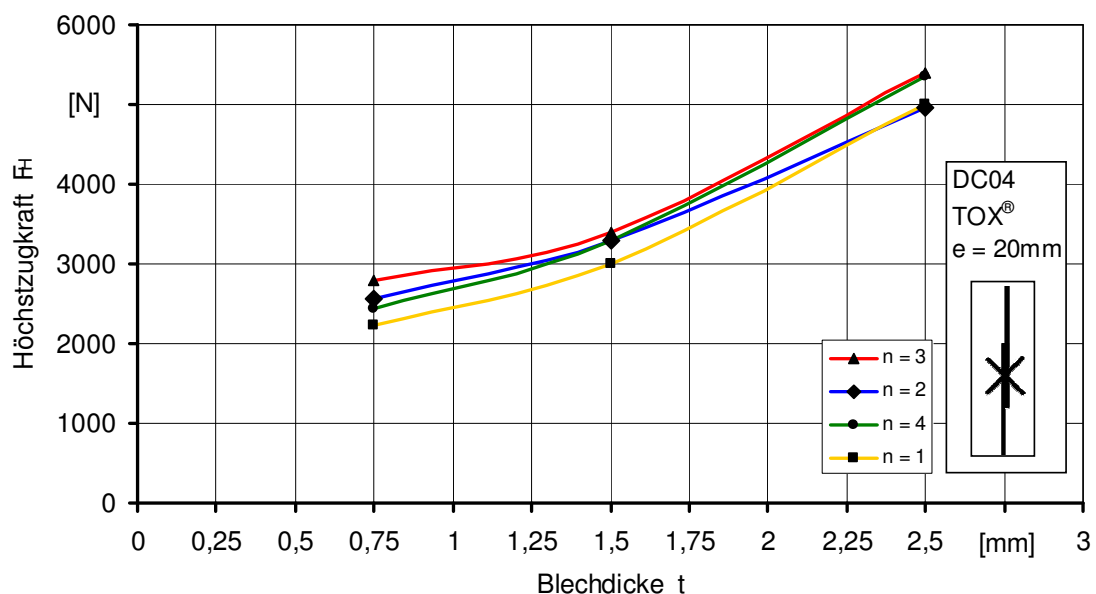


Abb. 6.1: Höchstzugkraft abhängig der Verbindungsanzahl unter Scherzugbeanspruchung der Versuchsreihen 0,75/0,75; 1,5/1,5; 2,5/2,5

Unter Schälzugbeanspruchung ist in Abb. 6.2 ein linearer Zusammenhang der Höchstzugkraft zur Blechdicke zu erkennen. Die Höchstzugkraft scheint für größere Blechdicken direkt proportional anzuwachsen. Die grafische Darstellung wurde anhand der 3 untersuchten Blechdicken 0,75mm; 1,5mm und 2,5mm erstellt.

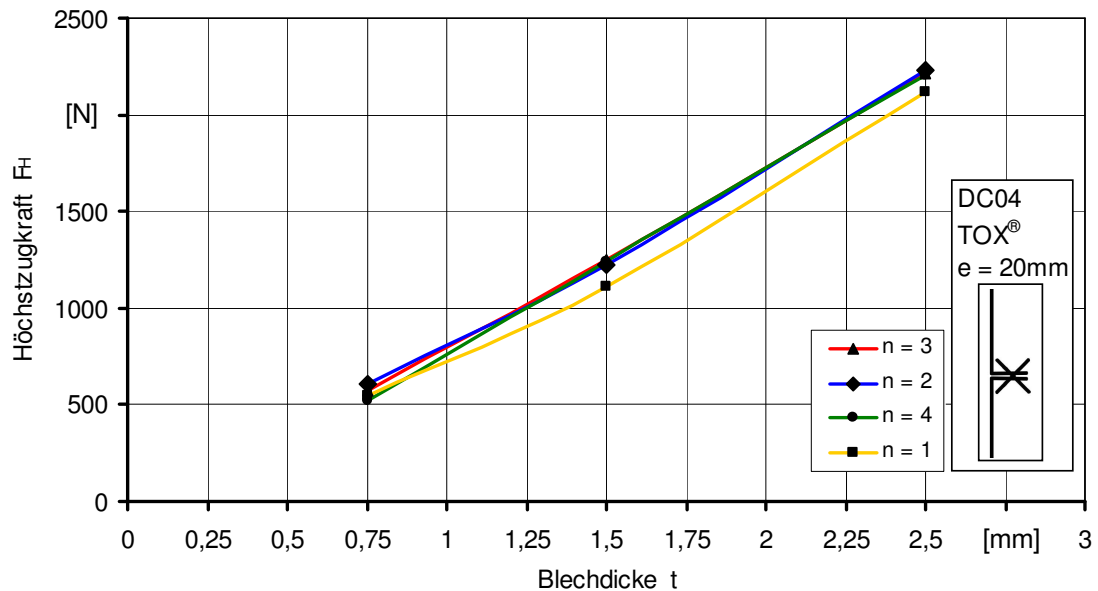


Abb. 6.2: Höchstzugkraft abhängig der Verbindungsanzahl unter Schälzugbeanspruchung der Versuchsreihen 0,75/0,75; 1,5/1,5; 2,5/2,5

6.1.3 Abhängigkeit der Höchstzugkraft vom Blechdickenverhältnis

Das Blechdickenverhältnis stellt das Verhältnis von stempelseitigem Blech zu matrixseitigem Blech dar. So ist z. B. für die Blechkombination 1,5/0,75 das Blechdickenverhältnis 2,0

$$\frac{1,50\text{mm}}{0,75\text{mm}} = 2,0$$

Das Blechdickenverhältnis soll seine Anwendung in der Nahtfaktorentabelle des Konstruktionssystems finden. In dieser Tabelle befinden sich Nahtfaktoren jeweils für spezielle Werkstoffe, abhängig von der Werkstoffdicke des stempelseitigen Bleches, des Fügeverfahrens und des Matrizendurchmessers. Mit den Nahtfaktoren, welche aus praktischen Versuchen resultieren, ist es möglich anhand einer mathematischen Gleichung die zu erwartende ertragbare Spannung der jeweiligen Clinchnaht zu errechnen. In Tab. 6.1 ist ein Beispiel einer Nahtfaktorentabelle dargestellt.

$R_{m,NR} = \alpha_N \cdot R_{m,min} \cdot \frac{e_{min}}{e}$					Fügeverfahren								
					Rundclinch (einstufig)								
					Matrize einteilig (TOX)				Matrize mehrteilig (Eckold)				
					d ₀ [mm]								
					6,0 < d ₀ ≤ 8,0		8,0 < d ₀ ≤ 10,0		6,0 < d ₀ ≤ 8,0		8,0 < d ₀ ≤ 10,0		
Werkstoff	Bezeichnung		R _{m,min} [Mpa]	Blechdicke t stempelseitig [mm]	Blechdickenverhältnis t ₁ /t ₂	α _N	e _{min}	α _N	e _{min}	α _N	e _{min}	α _N	e _{min}
						-	[mm]	-	[mm]	-	[mm]	-	[mm]
	Stahl	DC04	270	1,0 ≤ t ≤ 1,5	1 : 2								
					1 : 1	0,62	12			0,63	12	0,74	12
					2 : 1								
			1,5 < t ≤ 3,0	1 : 2									
				1 : 1									
			2 : 1										

Tab. 6.1: Beispiel einer Nahtfaktorentabelle

Im folgenden Diagramm (siehe Abb. 6.3) sind die Höchstzugkräfte für die Blehdickenverhältnisse dargestellt, die sich aus der Blechkombinationen 0,75/1,5; 0,75/0,75 und 1,5/0,75 ergeben. Die Darstellung erfolgt in Abhängigkeit der Verbindungspunkanzahl. Man kann erkennen, dass die Verbindungspunkanzahl keinen Ausschlag gebenden Einfluss auf die ertragbare Höchstzugkraft hat.

Mit zunehmendem Blehdickenverhältnis ist tendenziell eine Steigerung der Höchstzugkraft erkennbar. Ob der Zusammenhang eine lineare Abhängigkeit besitzt, lässt sich anhand der wenigen Messpunkte nicht sicher beurteilen. Um diese Abhängigkeit bestätigen zu können, sind weitere Untersuchungen nötig, die aber nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind. Im Diagramm ist erkennbar, dass unter Scherzugbeanspruchung auch das matrizenständige Blech einen Einfluss auf die Höchstzugkraft (je Verbindungspunkt) hat. Obwohl die Dicke des matrizenständigen Bleches abnimmt, steigt bei gleicher Dicke des Stempelseitigen Bleches die Höchstzugkraft.

Einfluss auf die Höchstscherzugkraft, und damit verbundene Festigkeit der Verbindung, hat unter Scherzugbeanspruchung also nicht nur das Stempelseitige Blech sondern auch das untere, matrizenständige Blech.

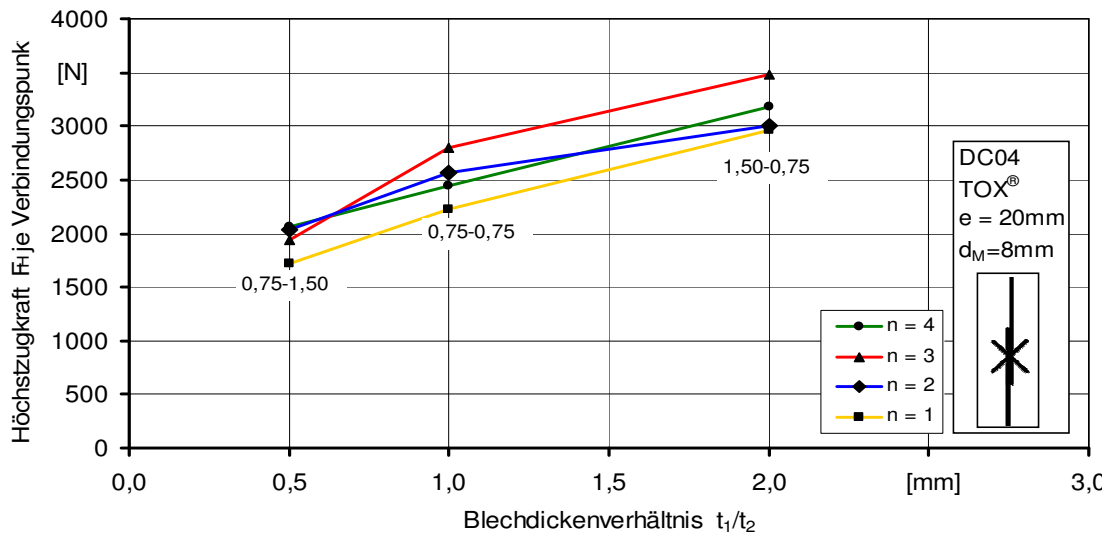


Abb. 6.3: Höchstzugkraft (je Verbindungspunkt) abhängig vom Blechdickenverhältnis unter Scherzugbeanspruchung der Versuchsreihe 0,75/1,5; 0,75/0,75; 1,5/0,75

Unter Schälzugbeanspruchung scheint bei konstanter Blechdicke(matrizenseitige) die Höchstzugkraft nicht zu steigen. Das untere, matrizenseitige Blech hat auf die Festigkeit der Verbindung keinen erkennbaren Einfluss.

Erst bei Zunahme des stempelseitigen Bleches ist eine Steigerung der Höchstzugkraft zu erkennen.

Unter Schälzugbeanspruchung hat also das matrizenseitige Blech bei den durchgeführten Versuchen keinen Einfluss auf die Festigkeit der Clinchverbindung.

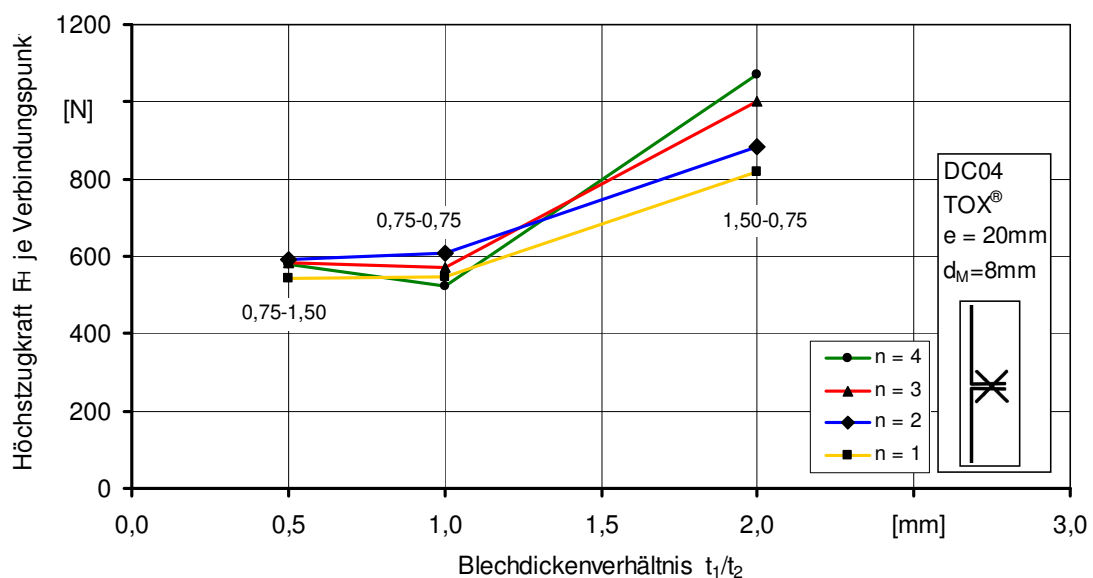


Abb. 6.4: Höchstzugkraft (je Verbindungspunkt) abhängig vom Blechdickenverhältnis unter Schälzugbeanspruchung der Versuchsreihe 0,75/1,5; 0,75/0,75; 1,5/0,75

6.1.4 Zusammenhang zwischen Höchstzugkraft und Verformung

Als Beispiel für den direkten Zusammenhang zwischen Höchstzugkraft und Versagen werden die fünf einzelnen Zugproben des Messpunktes $b=60/n=3/\text{Reihe } 1,5/0,75$ zu Hilfe genommen. Da die 5 Messwerte der Höchstzugkräfte (Abb. 6.5) unterschiedlich ausfallen soll hier die mögliche Ursache anhand der Verformung der Fügepunkte untersucht werden. In Abb. 6.6 sind die 5 Verbindungen dargestellt.

Punktzahl (n): 3		e = 20 mm		b (n*e) = 60 mm	
F1, max [N]	F2, max [N]	F3, max [N]	F4, max [N]	F5 max [N]	F _{m,mittel} [N]
10944,6	10767,0	10365,6	10779,0	9318,1	10767,0

Abb. 6.5: Messdaten des Messpunktes Reihe 1,5/0,75, $n = 3$, $e = 20$; $b = 60$

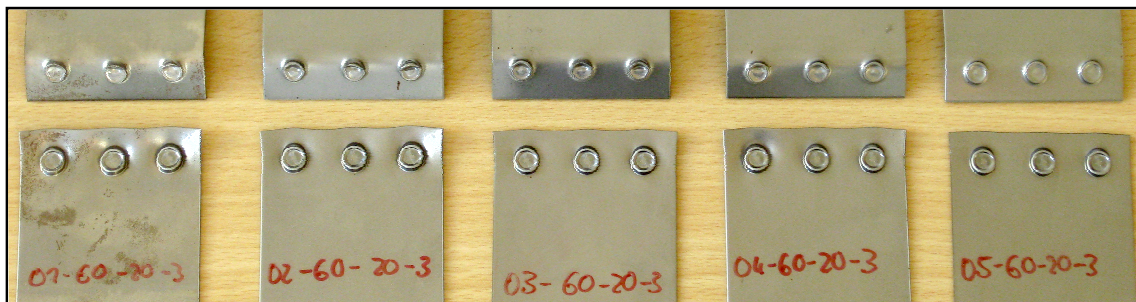


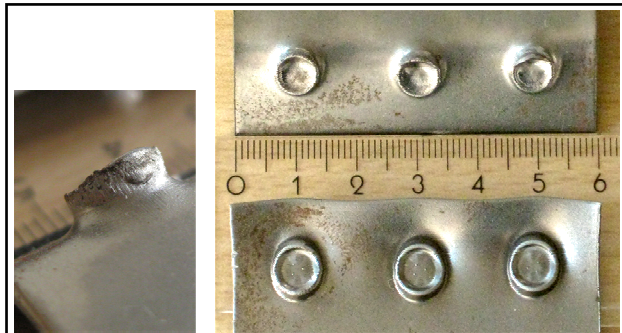
Abb. 6.6: Zugproben eines Messpunktes; $n=3$; $e=20$; $b=60$, Versuchsreihe 1,5/0,75

Wie man aus diesen Darstellungen bei genauer Betrachtung schon entnehmen kann, gehen die höheren Höchstzugkräfte mit mehr Verformung einher. Hier vor allem beim unteren, matrizenseitigen Blech. In der folgenden Abbildung sind diese 5 Verbindungen noch einmal der Reihe nach, allerdings von oben nach unten, in jeweils separaten, größeren Aufnahmen dargestellt. Hierbei lässt sich genau erkennen welche Probenbleche mehr verformt wurden. Die Verformung steht in direktem Zusammenhang mit der aufgenommen Höchstzugkraft. Die Verdrehung der Probenbleche im Fügebereich auf Grund des Momentes in der einschnittigen Verbindung ist bei allen 5 Proben vergleichbar.

Die dargestellten Bilder entsprechen in vergrößerter Form genau den oben (siehe Abb. 6.6) bereits abgebildeten Versagensbildern. Sie dienen dem besseren Verständnis der unterschiedlichen Versagenskräfte durch die unterschiedlichen Verformungsbilder.

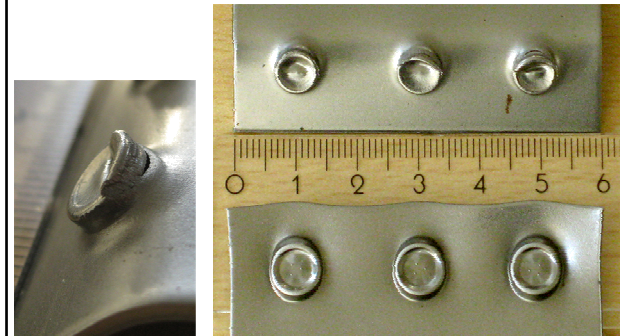
Probe 01: $F_{1,max} = 10944,6 \text{ N}$

Versagen: Mischversagen, starke Verformung aller drei Fügepunkte und des stempelseitigen Bleches in Punktebene bis zum Ausknöpfen → wellige Stirnseite des matrizen-
seitigen Bleches



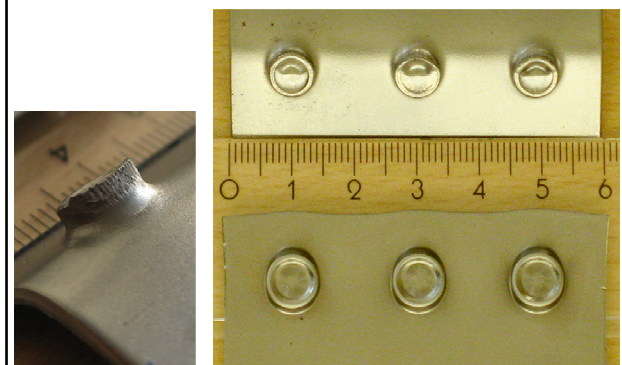
Probe 02: $F_{2,max} = 10767,0 \text{ N}$

Versagen: Mischversagen, starke Verformung zweier Fügepunkte (teilw. Abscheren) und des stempel-
seitigen Bleches in Punktebene bis zum Ausknöpfen → wellige Stirnseite
des matrizenseitigen Bleches



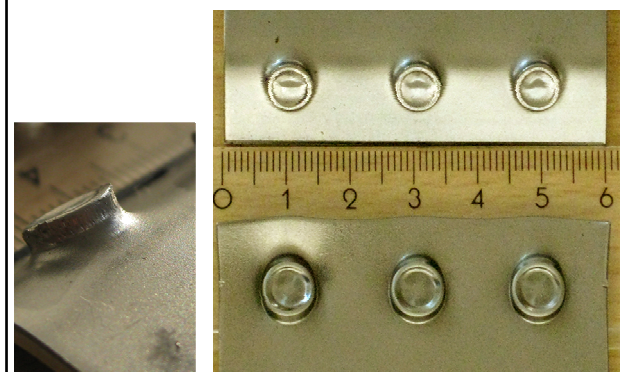
Probe 03: $F_{3,max} = 10365,6 \text{ N}$

Versagen: Mischversagen, starke Verformung zweier Fügepunkte und
des stempelseitigen Bleches in Punktebene, bis zum Ausknöpfen
→ wellige Stirnseite des matri-
zenseitigen Bleches



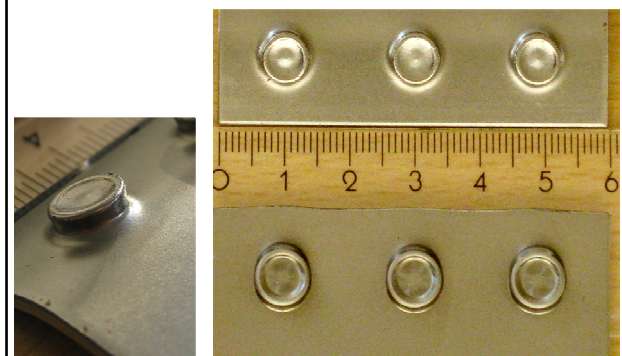
Probe 04: $F_{4,max} = 10779,0 \text{ N}$

Versagen: Mischversagen, starke Verformung zweier Fügepunkte und
des stempelseitigen Bleches in Punktebene, bis zum Ausknöpfen
→ wellige Stirnseite des matrizen-
seitigen Bleches



Probe 05: $F_{5,max} = 9318,1 \text{ N}$

Versagen: Mischversagen, leichte Verformung der Fügepunkte und
des stempel-seitigen Bleches in Punktebene, bis zum Ausknöpfen,
geringste Scherzugkraft



Abschließende Bemerkung:

Die gemachten Beobachtung stärken die These, das die Höchstscherzugkraft abhängig von der bis zum „Bruch“ geleisteten Verformung ist. Da allerdings alle 5 Clinchproben auf die gleiche Art und Weise gefügt wurden und aus dem gleichen Material der gleichen Charge bestehen, ist es unklar das die Zugprobe 05 ca. 1,4kN (~13%) unter der zu erwartenden Höchstzugkraft liegt. Bei Begutachtung der Streuung der anderen Messreihen kann allerdings davon ausgegangen werden, dass diese Streuung für das Fügeverfahren des Clinchens normal ist.

6.1.5 Abhängigkeit der Höchstzugkraft von der Beanspruchungsrichtung

Im Folgenden soll an einem konkreten Beispiel der Einfluss der Beanspruchungsrichtung auf die Höchstzugkraft untersucht werden. Dazu werden die ermittelten Höchstzugkräfte für Scherzug(0°), Schälzug(90°) und Schrägzug(45°) für die Punktzahlen $n = 1$, $n = 2$ und $n = 3$ für $e=20\text{mm}$ zu Hilfe genommen. Alle Höchstzugkräfte wurden auf einen Fügepunkt ($n=1$) normiert. D. h. die Höchstzugkraft für $n=3$ mit 3 dividiert, für $n=2$ mit 2 dividiert. Die Ergebnisse sind tabellarisch in Tab. 6.2 dargestellt.

Punktzahl	0		45		90	
	F_H [N]	F_H / Punkt [N]	F_H [N]	F_H / Punkt [N]	F_H [N]	F_H / Punkt [N]
1	3002	3002,00	3016	3016,00	1112	1112,00
2	6583	3291,50	6099	3049,50	2441	1220,50
3	10184	3394,67	9592	3197,33	3755	1251,67

Tab. 6.2: *Tabelle der Höchstzugkräfte für Beanspruchungsrichtungen 0°, 45°, 90° und $e = 20\text{mm}$*

In Abb. 6.7 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Es ist gut erkennbar, dass zwischen Scherzugbeanspruchung (0°) und 45°-Schrägzugbeanspruchung kaum Unterschiede hinsichtlich der Höchstzugkraft bestehen. Dies liegt vermutlich an der Fixierung der 45°-Proben durch die Spezial-Probenhalter (Abb. 4.3) und den Querkraftaufnehmern. Die spezielle Geometrie der Zugprobe und der Clinchverbindung wirkt sich bei diesem Zugversuch stabilisierend auf die Verbindung aus und hat somit ähnliche Höchstzugwerte wie unter Scherzugbeanspruchung. Genauer ist dieser Vorgang unter Abschnitt 6.2.3 erläutert und nachzulesen. Erst unter Schälzugbeanspruchung ist in der Grafik ein deutlicher Abfall der Höchstzugkraft erkennbar. Es kann für diese Versuche also kein linearer Verlauf der Höchstzugkraft in Abhängigkeit der Beanspruchungsrichtung festgestellt werden.

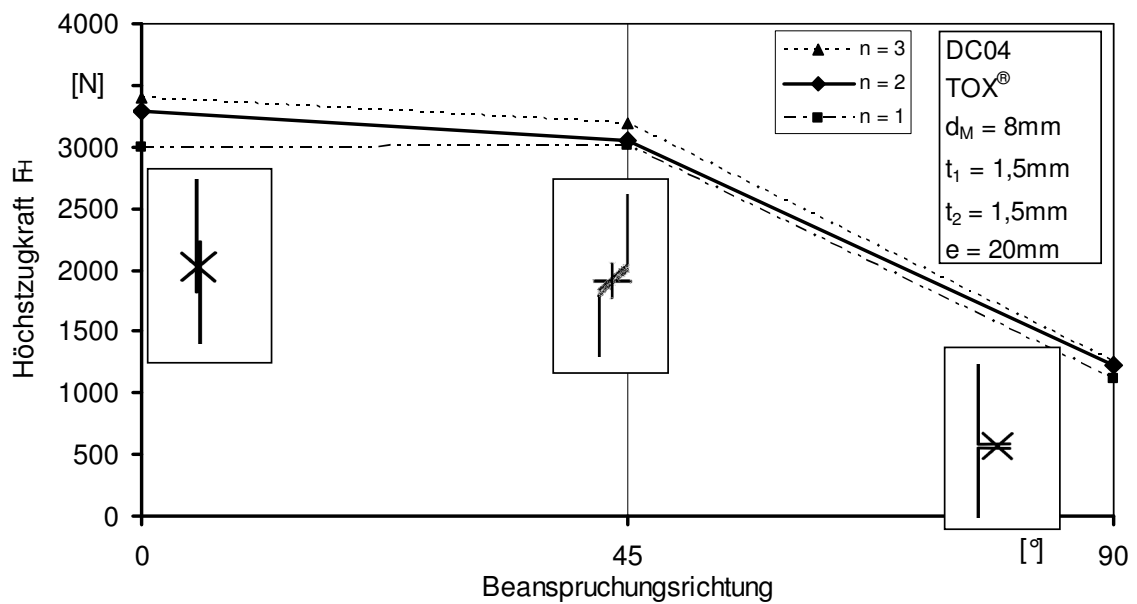


Abb. 6.7: Höchstzugkraft abhängig von der Beanspruchungsrichtung

6.1.6 Abhängigkeit der Höchstzugkraft von der Mittigkeit der Clinchverbindungen im Überlappungsbereich unter Scherzugbeanspruchung

Diese Untersuchung beschränkt sich auf die Scherzugbelastung und untersucht die Abhängigkeit der Höchstzugkraft von der mittigen Anordnung der Clinchverbindungen im Überlappungsbereich. Mittig bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Fügepunkte exakt in einer Linie mittig im Überlappungsbereich, parallel zur Materialkante (der jeweiligen Probenbreite) verlaufen.

Um diese Untersuchung führen zu können wurden 2 Arten 4-Punkt-Proben, jeweils mit einem Stichprobenumfang von $n=10$ angefertigt und im Zugversuch überprüft:

1. 10 Proben bei denen alle Verbindungspunkte exakt mittig in einer Linie parallel zur Materialkante der Probenbreite verlaufen, Bezeichnung: TIR
2. 10 Proben bei denen ein Punkt (zur Fixierung) mit der Fügevorrichtung mittig gesetzt wurde, die anderen 3 Punkte wurden mit korrektem Abstand e , jedoch unwillkürlich außermittig gesetzt, Bezeichnung: TAR

Die Blechdicke der Probenbleche betrug $t_1=t_2=1,5\text{mm}$, $d_M=8\text{mm}$; der Fügepunkt Abstand $e=30\text{mm}$, die Punktzahl $n=4$. Daraus resultiert die Gesamtprobenbreite $b=120\text{mm}$. Das untersuchte Material ist DC04, wie auch bei allen anderen Versuchsreihen in dieser Arbeit.

Mit dieser Untersuchung soll ermittelt werden, ob ein Einfluss der außermittigen Anordnung der Fügepunkte im Scherzugversuch einen negativen Einfluss auf die Höchstzugkraft hat.

Die Schälzugbeanspruchung wird nicht untersucht, da der direkter Einfluss der Mittigkeit der Fügepunkte auf Grund der Probengeometrie offensichtlich erscheint und die unwillkürlich außermittige Anordnung der Fügepunkte eine negative Auswirkung auf die Höchstzugkraft zur Folge hätte.

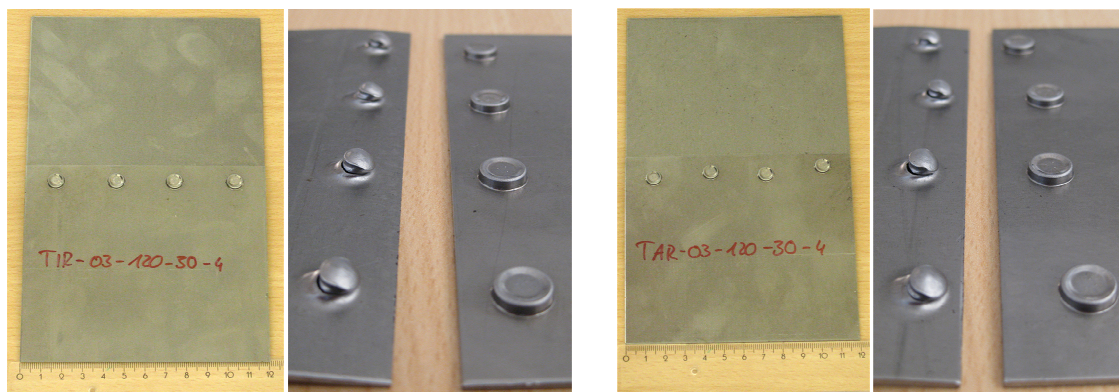


Abb. 6.8: Zugprobenbilder - Links: mittig gesetzte Fügepunkte; Rechts: außermittig gesetzte Fügepunkte

In Abb. 6.9 sind die Höchstzugkräfte der Versuchsreihe TIR (Probenbleche für die mittig gesetzten Clinchverbindungen) als Balkendiagramm dargestellt, in Abb. 6.10 für die Versuchsreihe TAR (außermittig gesetzte Clinchverbindungen). Die Schwankungen der Höchstzugkräfte lassen sich wieder auf das Versagensbild zurückführen.

Versagensanalyse (siehe Abweichungen in Abb. 6.9):

Proben 1; 2; 3; 4; 5; 6; 10: Mischversagen, (Abscheren und Ausknöpfen) mit größerem Scheranteil und Verformung der Bleche im Verbindungsbereich/Überlappungsbereich durch Moment-Wirkung der einschnittigen Verbindung

Proben 7; 8; 9: reines Abscheren der Verbindungen, ohne Verformung der Bleche im Verbindungsbereich

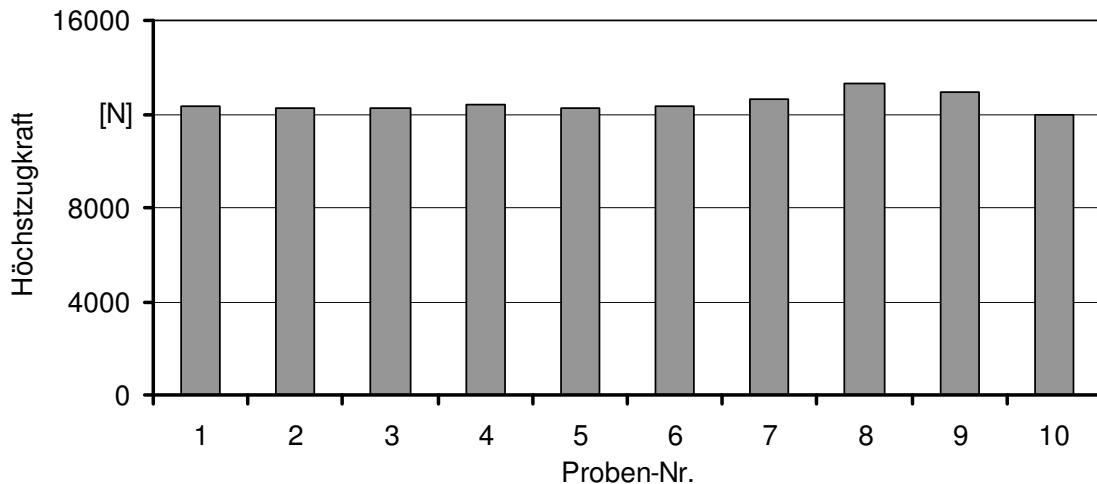


Abb. 6.9: Höchstzugkräfte der mittig gefügten Probenbleche, Testreihe TIR

Versagensanalyse TAR (siehe Abweichungen in Abb. 6.10):

Proben 1; 2; 3; 4; 5; 7; 8: Mischversagen, (Abscheren und Ausknöpfen) mit größerem Scheranteil und Verformung der Bleche im Verbindungsbereich/Überlappungsbereich durch Moment-Wirkung der einschnittigen Verbindung

Proben 6; 9; 10: reines Abscheren der Verbindungen, ohne Verformung der Bleche im Verbindungsbereich

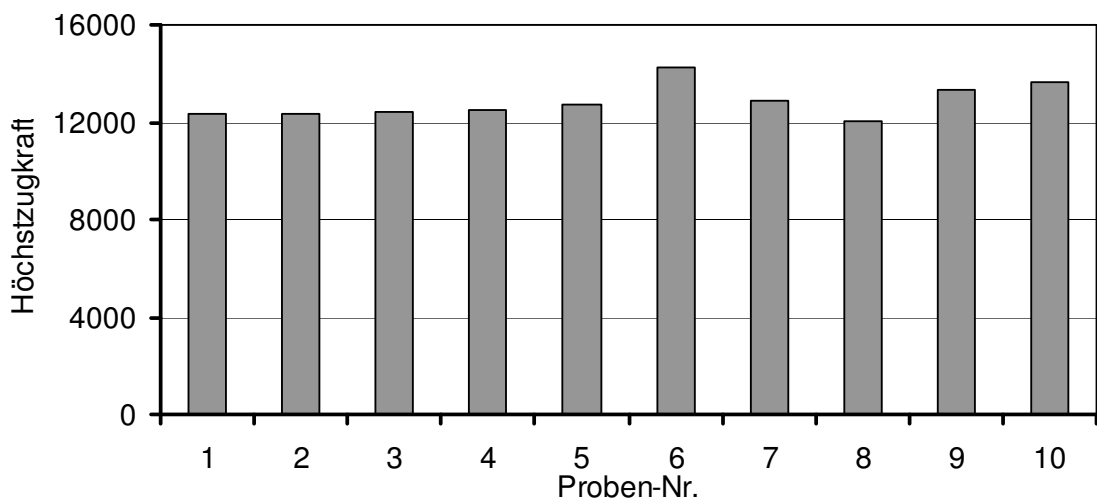


Abb. 6.10: Höchstzugkräfte der außermittig gefügten Probenbleche, Testreihe TAR

Die Messwerte beider Testreihen sind bis auf die wenigen Ausnahmen sehr konstant. Die aufgetretenen Ausnahmen können als normale Abweichung für Clinchverbindungen angesehen werden. In Tab. 6.3 sind die genauen Höchstzugwerte und die sich daraus ergebenden Mittelwerte der Testreihen dargestellt.

	Höchstzugkraft für Proben-Nr.										$F_{H,mittel}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
F_H TIR [N]	12321,2	12250,1	12258,9	12401,9	12245,5	12353	12634,1	13339,2	12929,9	11940,9	12526
F_H TAR [N]	12372,8	12325,8	12440,7	12467	12717,1	14232,3	12859,3	12070,1	13304,2	13629,5	12842

Tab. 6.3: Höchstzugwerte der Testreihen TIR/TAR

Der Mittelwert der außermittig gefügten Testreihe TAR liegt sogar 316N höher als der der mittig gefügten Testreihe TIR. Das entspricht einer Abweichung von ca. 2,5% und kann somit als vernachlässigbar klein angesehen werden.

Die außermittige Anordnung der Fügepunkte hat also keinen negativen Einfluss auf die Höchstzugkraft unter Scherzugbeanspruchung und fällt somit auch aus einer etwaigen Fehlerbetrachtung heraus. Für die Praxis bedeutet das, dass kleine Toleranzen in dieser Hinsicht keinen negativen Einfluss auf die Festigkeit der Verbindungen haben.

6.2 Auswertung hinsichtlich der Grenznahtfestigkeit

Die Grenznahtfestigkeit resultiert aus der Höchstzugkraft. Sie ermöglicht die Spannungsbezogene Festigkeitsangabe für Clinchverbindungen. In diesem Abschnitt wird die Herleitung der Grenznahtfestigkeit und die Abhängigkeit hinsichtlich der Blechdicke und der Beanspruchungsrichtung diskutiert.

6.2.1 Herleitung der Grenznahtfestigkeit

[MRL-06] Ausgangspunkt für die Herleitung der Grenznahtfestigkeit, sind die im Zugversuch ermittelten Höchstzugkräfte F_H für die gefügten Ein- und Mehrpunktproben mit unterschiedlichen Verbindungsabständen e . Man Kann in folgender Darstellung(siehe Abb. 6.11) erkennen, dass bei den Proben gleichen Punktabstandes e , zwischen den einzelnen Punktzahlen n und den Höchstzugkräften ein proportionaler Zusammenhang besteht. Somit werden die Werte für gleiche Punktabstände im Diagramm interpolierend mit einer Gerade verbunden. Als Analogie zur Grenznahtkurve kann man abstrahierend sagen, dass der Anstieg m der interpolierten Gerade dividiert durch die Blechdicke die reale Zugfestigkeit $R_{m,Naht}$ ergibt. Dies stimmt nicht zu 100% mit der hier genutzten Herleitung des Wertes für $R_{m,Naht}$ überein, aber prinzipiell ist der Zusammenhang korrekt.

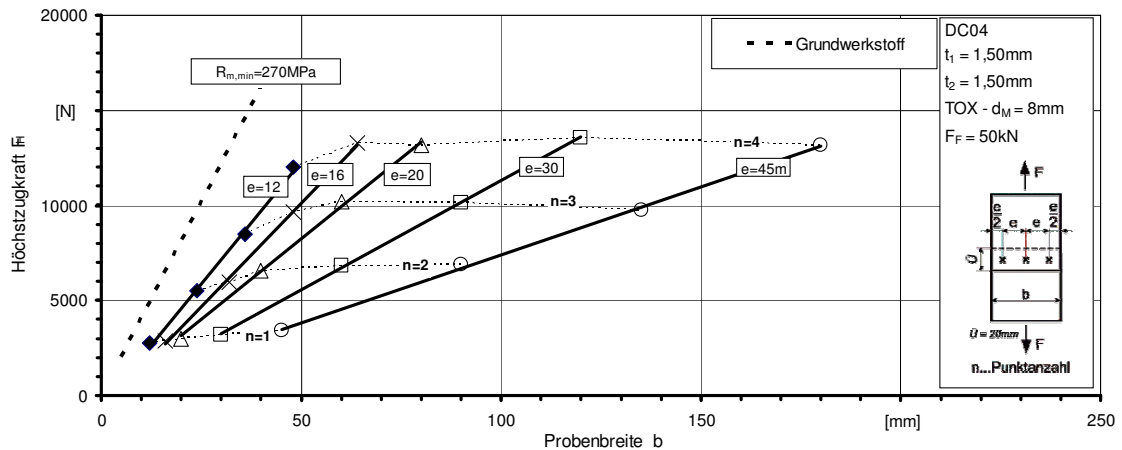


Abb. 6.11: Höchstzugkräfte von Clinchverbindungen in Abhängigkeit der Probenbreite für unterschiedliche Verbindungsanzahlen und Punktabstände einer Versuchsreihe

Der Anstieg der Gerade lässt sich, Durchgang durch den Koordinatenursprung vorausgesetzt, angeben mit der Funktion

$$F_H = m \cdot b \quad (6.1)$$

Die Höchstscherzugkräfte können auch als Produkt aus Spannung (Beanspruchbarkeit R) mal Fläche A angegeben werden. Als beanspruchte Fläche ist das Produkt aus Nahtlänge (Probenbreite b) und Blechdicke t anzusetzen.

$$F_H = R \cdot A = R \cdot b \cdot t \quad (6.2)$$

Der o.G. Anstieg m lässt sich also wie folgt zusammenfassen:

$$m = R \cdot t \quad (6.3)$$

Die Beanspruchbarkeit in Form der Grenznahtfestigkeit lässt sich nun einfach berechnen aus der Division der Höchstzugkraft durch die Querschnittsfläche der gesamten Probenbreite.

$$R_{m,Naht} = \frac{F_{H,mittel}}{b \cdot t} \quad (6.4)$$

Bei der Annahme, dass die Verbindungspunkte gleichmäßig, also im konstanten Abstand über die Naht verteilt sind, kann man somit von einer konstanten Grenznahtfestigkeit über die gesamte Probenbreite ausgehen.

Die Probenbreite kann ersetzt werden durch:

$$b = n \cdot e \quad (6.5)$$

so dass gilt:

$$R_{m,Naht} = \frac{F_m}{n \cdot e \cdot t} \quad (6.6)$$

Die Beanspruchbarkeit einer Verbindung $R_{m,Naht}$ ist abhängig vom Verbindungsabstand und lässt sich in einer Grenznahtkurve grafisch darstellen. (Abb. 6.12)

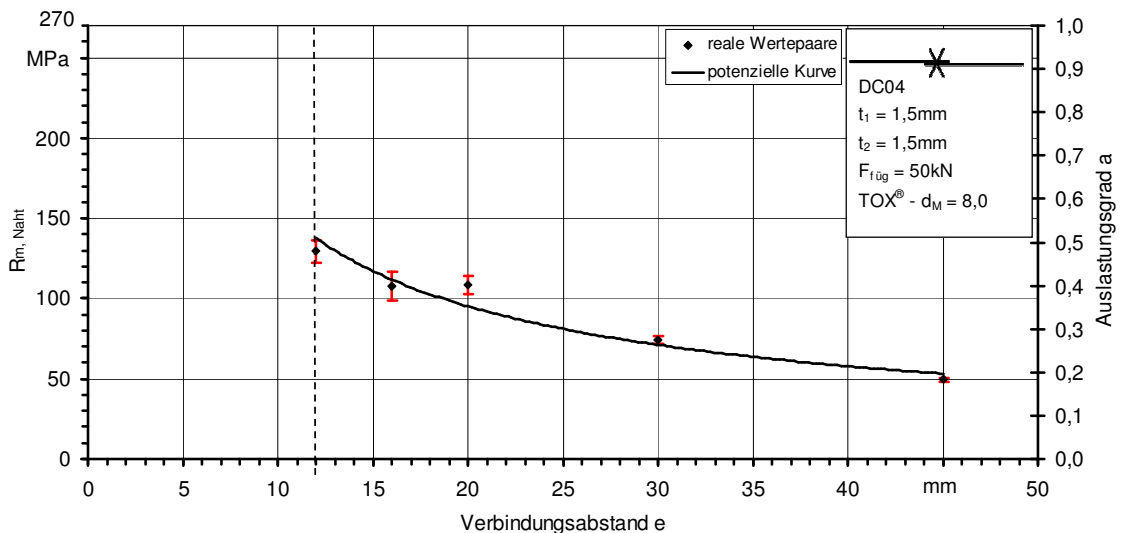


Abb. 6.12: Grenznahtkurve mit Standardabweichung(rot) für die Versuchsreihe 1,5/1,5

Der Kurvenverlauf nähert sich asymptotisch der Koordinatenachse. Der Kurvenverlauf ist allerdings begrenzt durch e_{min} , dem minimal technisch realisierbaren Verbindungsabstand und $e=45\text{mm}$, dem größten untersuchten Verbindungsabstand. Dieser Bereich hat praktisch die größte Bedeutung für die Fertigung.

6.2.2 Abhängigkeit der Grenznahtfestigkeit von der Blechdicke

Die Grenznahtfestigkeit bzw. der Wert der Grenznahtfestigkeit ist immer bezogen auf eine Blechdicke. Das bedeutet, dass bei gleicher Grenznahtfestigkeit (gleiche vorliegende Spannung im Material) eine dickere Blechverbindung eine höhere Kraft übertragen kann, während eine dünnere Blechverbindung eine geringere Kraft übertragen kann. Außerdem ist die Grenznahtfestigkeit abhängig vom Verbindungspunktabstand, wie auch in Abb. 6.13 dargestellt.

Die dargestellten Kurven entsprechen den realen Messwerten für die Versuchsreihen 0,75/0,75, 1,5/1,5 und 2,5/2,5 mit den schwarzen Kurven und jeweils die normierten Werte mit den blauen Kurven.

Wie man erkennen kann steht die oberste Kurve für die Verbindungsreihe 0,75/0,75. Die Kurve steht deshalb an oberster Stelle, weil sie normiert auf ihre Blechdicke die

höchste Materialauslastung aufweist. Das bedeutet nicht das sie die höchste Kraft übertragen kann.

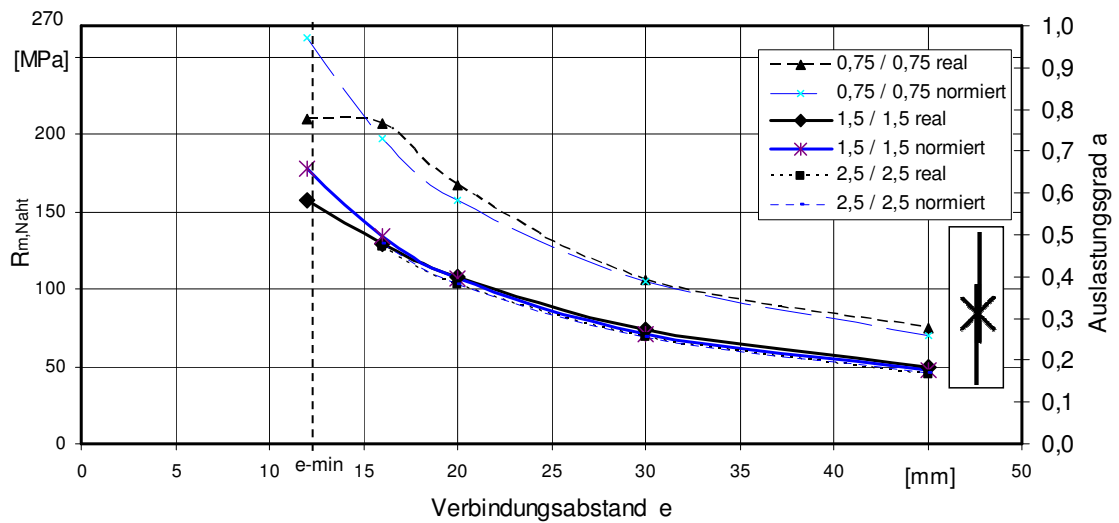


Abb. 6.13: Grenznahtfunktionen real und normiert für Versuchsreihen 0,75/0,75; 1,5/1,5; 2,5/2,5 unter Scherzugbeanspruchung

Im folgenden 3D-Modell (siehe Abb. 6.14) sind die oben dargestellte Grenznahtkurven (siehe Abb. 6.13) räumlich vernetzt eingetragen. Zu Grunde liegen die normierten Messwerte der drei Blechdicken 0,75mm; 1,5mm; 2,5mm. Dieses Modell gilt nur für DC04 und die genutzten Matrizendurchmesser. Die höchste Materialauslastung ist deutlich bei 0,75mm Blechdicke erkennbar. Die Grenznahtfestigkeit für dickere Bleche fällt stark ab. Bei 1,5mm Blechdicke können bei minimalem Punktabstand noch ca 180MPa übertragen werden, bei 2,5mm nur noch ca. 140MPa. Diese Angaben sowie das Modell gelten ausschließlich unter Scherzugbeanspruchung.

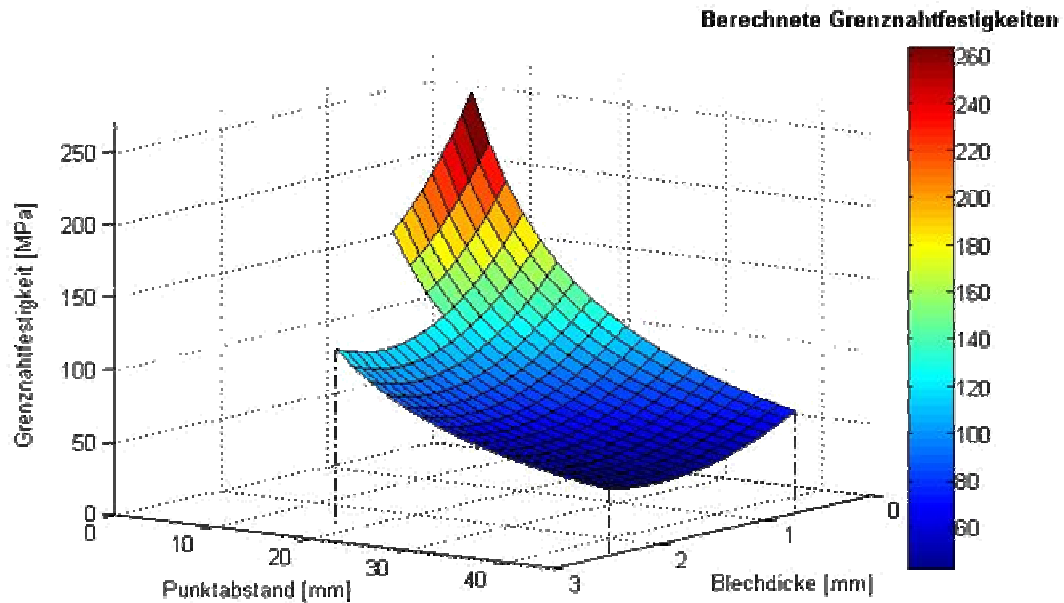


Abb. 6.14: vernetzte Grenznahtfunktionen als 3D-Modell der Versuchsreihen 0,75/0,75; 1,5/1,5; 2,5/2,5 unter Scherzugbeanspruchung

6.2.3 Abhängigkeit der Grenznahtfestigkeit von der Beanspruchungsrichtung

Die Auswertung in diesem Abschnitt erfolgt für die Blechedicke $t_1=t_2=1,5\text{ mm}$. Ähnlich wie bei der Höchstzugkraft, ist der Unterschied zwischen den Grenznahtkurven für 0° und 45° sehr gering. Das liegt daran, dass bei der 45° Probe durch den Querkraftaufnehmer und die 45° -Probenhalter die Verbindung selbst hauptsächlich auf Scherzug beansprucht wird, da sie in ihrer Lage und Bewegungsrichtung fixiert ist.

Da die Werte der Kurve für 45° -Schrägzug im Anfangsbereich höher sind als die Werte unter Scherzugbeanspruchung kann auf Grund der geringen Abweichung als Streuung interpretiert werden. Durch die 45° -Schrägzugproben sollte die Untersuchung im Übergangsbereich der Beanspruchungsrichtung zwischen 0° und 90° ermöglicht werden. Vermutet wurde das sich dementsprechend auch die Höchstzugkraft im Übergangsbereich einstellt. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass sich die Höchstzugkraft und damit auch die Grenznahtkurven der 45° -Schrägzugproben auf dem gleichen Niveau befindet wie unter Scherzugbeanspruchung. Die hier verwendeten 45° -Schrägzugproben eignen sich sozusagen nicht um einen Übergangsbereich der Festigkeit zwischen 0° (Scherzugbeanspruchung) und 90° (Schälzugbeanspruchung) ermitteln zu können. Die Ursache dafür ist im Kraftfluss zu suchen. Für den hier verwendeten 45° -Schrägzug wirkt die Kraft stabilisierend auf die Verbindung (genau entlang der Blechebene). Das Probenblech kann sich trotz der Querkraftaufnehmer im Verbin-

dungsbereich etwas in Richtung Kraftfluss verformen. Ähnlich würde vermutlich das Ergebnis für Schälzugproben aussehen, die nach dem gleichen Prinzip gefertigt sind wie diese 45°-Schrägzugproben (s-förmig).

Anders verhält es sich bei der hier angewendeten Schälzugprobengeometrie. Im Fügepunkt muss der Kraftfluss seine Richtung um 180° ändern. Dies wirkt instabil auf die Verbindung. Das Versagen wird in diesem Fall immer Ausknöpfen oder Halsabriss sein. Der Halsabriss tritt auf wenn die Verbindungen ausreichend Hinterschnitt oder genügend Blechdicke(-steifigkeit) aufweisen um das Versagen durch Ausknöpfen zu umgehen.

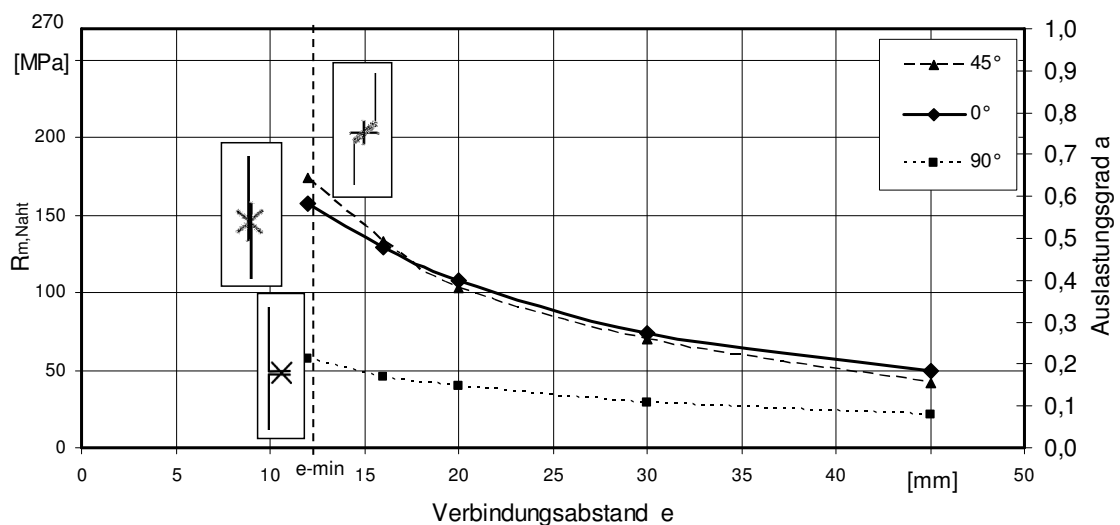


Abb. 6.15: Grenznahtfunktionen der Versuchsreihe 1,5/1,5 für Beanspruchungsrichtungen 0°, 45°, 90°

Ein Vorschlag für eine Verbindung im Übergangsbereich zwischen der hier genutzten Scherzugbeanspruchung und Schälzugbeanspruchung könnte aussehen wie eine Schälzugprobe, nur dass eine Seite auf nur 45° aufgebogen wird, die andere Seite jedoch auf 135° überkantet wird. Allerdings würde die Fertigung solcher Proben wesentlich komplizierter sein. Abgesehen von der Fertigung ist die Sinnigkeit solcher Proben zweifelhaft. Eine Clinchverbindung muss immer beidseitig zugänglich sein und nach dem Fügen werden vermutlich keine (oder nur in absoluten Ausnahmen) Umformungen am Blech vorgenommen, die einer solchen Probenform entsprechen.

6.3 Analyse der Festigkeitseigenschaftsfelder

In diesem Punkt soll die Abhängigkeit des Fügepunktabstandes von der Höchstzugkraft für die untersuchten Versuchsreihen anhand der Festigkeitseigenschaftsgitter dargestellt werden. Unter einem Festigkeitseigenschaftsfeld versteht man ein Diagramm (Höchstzugkraft über Gesamtprobenbreite) in dem die Höchstzugkräfte einer Versuchsreihe für eine Beanspruchungsrichtung dargestellt sind. In diesem Diagramm lassen sich Zusammenhänge zwischen der Höchstzugkraft und dem Punktabstand, der Punktzahl, und Gesamtprobenbreite erkennen. Beispielsweise steigt bei gleich bleibendem Punktabstand die Höchstzugkraft stets proportional mit der Punktzahl. Dies unterliegt natürlich der normalen Streuung (siehe Abschnitt 6.1.4).

Sinn der Untersuchung ist festzustellen, ob die verschiedenen Versuchsreihen hinsichtlich ihres Festigkeitseigenschaftsfeldes Ähnlichkeiten aufweisen, die eine analytische Berechenbarkeit vermuten lassen. Da der lineare Zusammenhang zwischen Höchstzugkraft und Punktzahl eines konstanten Punktabstandes bereits erwiesen ist, wird hier besonderes Augenmerk auf den Verlauf der Messpunkte gleicher Punktzahl gelegt. Die Möglichkeit der Berechnung dieser Kurven soll hier diskutiert werden. Die Analyse erfolgt wieder anhand der Höchstzugkräfte, jedoch wird der Verlauf der sich ergebenden Kurven im Festigkeitseigenschaftsdiagramm ausgewertet.

Versuchsreihe 1,5/1,5:

Unter Scherzugbeanspruchung (Abb. 6.16) kann ein Anstieg der Höchstzugkraft bis zum Punktabstand $e=20\text{mm}$ verzeichnet werden. Danach ist vor allem bei den 3- und 4-Punkt-Proben kein markanter Anstieg mehr erkennbar. Man kann davon ausgehen das bei höheren Punktabständen die Höchstzugkräfte nicht weiter ansteigen. Eine geeignete Funktion um die Messpunkte gleicher Punktzahlen verbinden zu können (gestrichelte Linien), ähnelt einer Sättigungsfunktion, die bis zu einer bestimmten Größe anwächst und dann konstant bleibt.

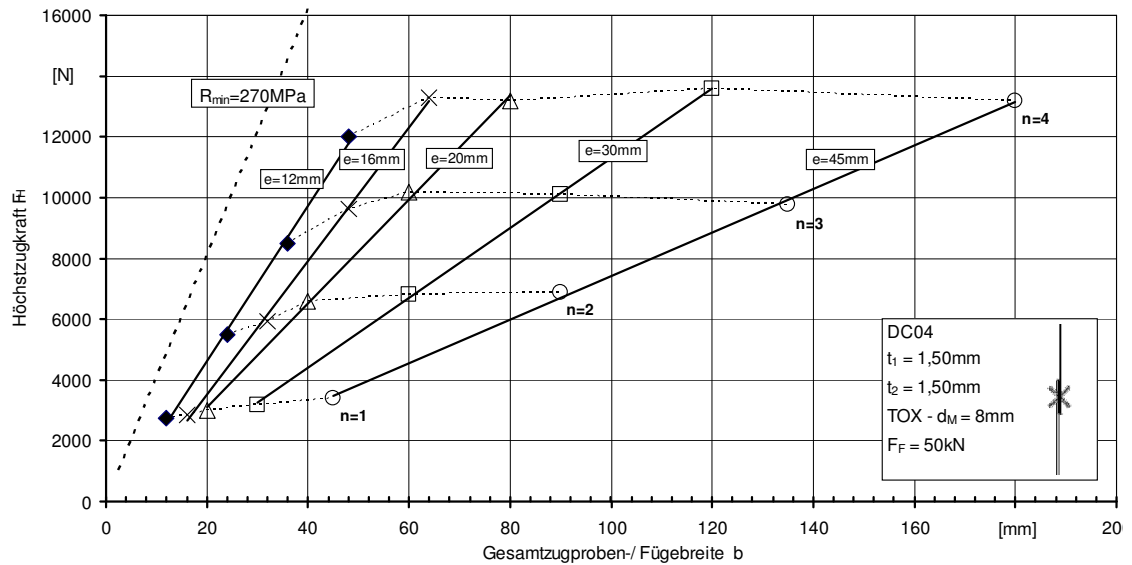


Abb. 6.16: Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 1,5/1,5 unter Scherzugbeanspruchung

Auch unter Schälzugbeanspruchung (siehe Abb. 6.17) lässt sich eine Sättigungsfunktion vermuten, die zur Beschreibung einer passenden Kurve dienen könnte. Es ist aber nicht ersichtlich ob die Höchstzugkraft für die Punktzahlen $n=1$; 2; 3 mit noch größerem Punktabstand eventuell weiter zunehmen würde. Für $n=4$ scheint der Maximalwert der Höchstzugkraft für $e=30\text{mm}$ bereits erreicht. Daher ist es unwahrscheinlich, dass die Höchstzugkräfte für $n=1$; 2; 3 mit zunehmendem Punktabstand noch wesentlich größer werden.

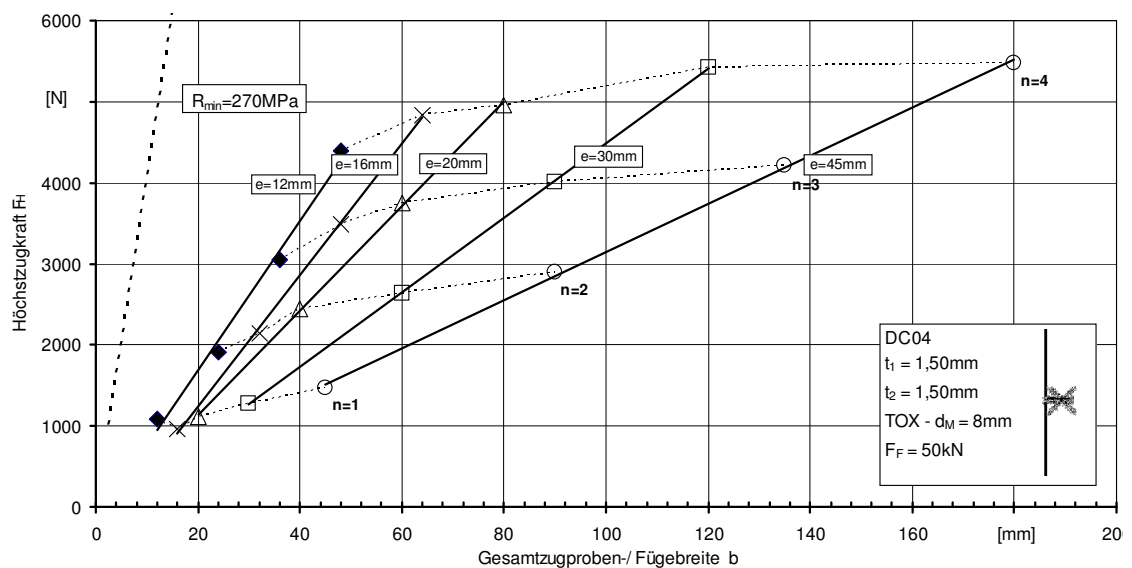


Abb. 6.17: Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 1,5/1,5 unter Schälzugbeanspruchung

Versuchsreihe 0,75/0,75:

Das Festigkeitseigenschaftsgitter für Scherzugbeanspruchung (Abb. 6.18) wirkt sehr unübersichtlich. Dies liegt einerseits daran, dass die Höchstzugkräfte der Punktabstände $e=12\text{mm}$ und $e=16\text{mm}$ sich teilweise überlagern, daher wird vorgeschlagen, die Höchstzugkräfte für $e=12\text{mm}$ nicht zu berücksichtigen. Dadurch wird die grafische Darstellung übersichtlicher. Andererseits sind die Höchstzugwerte der 3- und 4-Punkt-Proben für $e=30\text{mm}$ und die 2- und 3-Punkt-Proben für $e=45\text{mm}$ niedriger als zu erwarten wäre. Die Standardabweichung dieser Messpunkte ist allerdings sehr gering, was für ein gleichmäßiges/gleichartiges Versagen der jeweils 5 Proben spricht. Es ist jedoch auffällig, dass diese Zugproben im Zugversuch nur einen sehr kurzen Weg bis zum Bruch der Verbindung benötigen. Außerdem kann man bei genauer Betrachtung der zerstörten Clinchverbindungen erkennen, dass diese Fügpunkte kaum verformt wurden, während die meisten anderen Proben dieser Versuchsreihe teilweise starke Verformungen aufweisen. Merkwürdig ist, dass nur die besagten Zugproben betroffen sind, zumal alle Proben mit den gleichen Parametern gefertigt wurden. Die 4-Punkt Zugprobe für $e=45\text{mm}$ verhält sich wieder wie alle Zugproben im unteren Bereich. Es kann kein offensichtlicher Grund für die Abweichung dieser Messpunkte festgestellt werden. Es ist daher ratsam, die besagten Zugproben zu wiederholen oder die gesamte Versuchsreihe erneut zu fügen, um eventuelle Abweichungen der Materialfestigkeit einer anderen Charge ausschließen zu können.

Würde man von besagten Messwerten absehen, könnte man auch hier auf eine Sättigungsfunktion als beschreibende Funktion der Kurven gleicher Punktzahlen schließen.

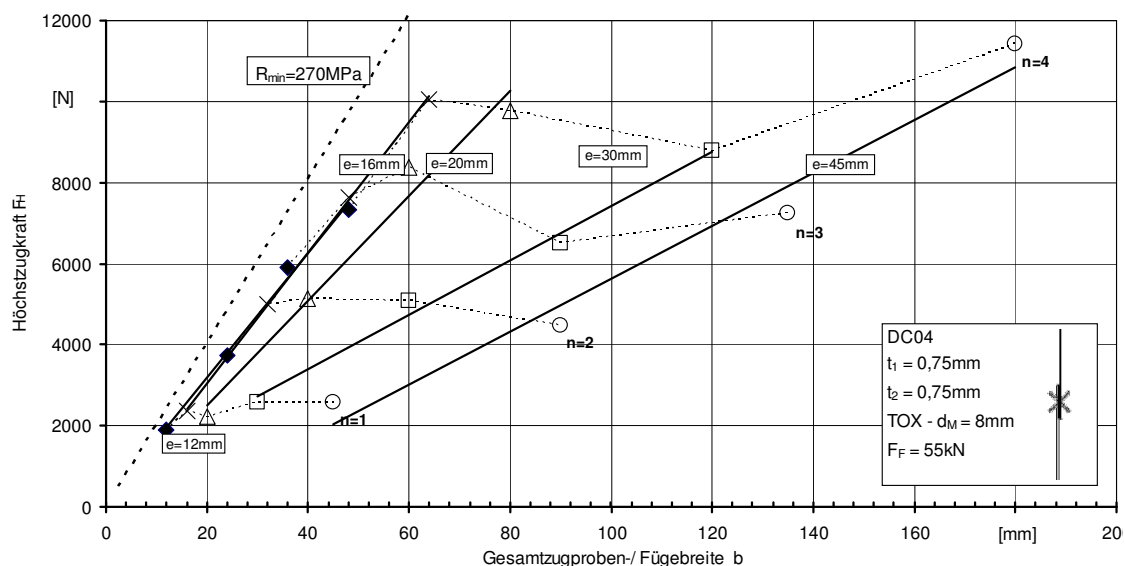


Abb. 6.18: Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 0,75/0,75 unter Scherzugbeanspruchung

Aus der grafischen Darstellung (siehe Abb. 6.19) kann man erkennen, dass die Höchstzugkräfte unter Schälzugbeanspruchung mit steigendem Punktabstand tenden-

ziell abnehmen. Erklären lässt sich dieses Verhalten mit der Steifigkeit des Bleches. Da es nur halb so dick ist wie das Blech der Versuchsreihe 1,5/1,5, können die Fügunkte bei steigendem Punktabstand nicht mehr so viel Kraft übertragen. Dieses Verhalten hat vermutlich folgende Ursache: Da die dünnen Probenbleche durch den geringen Punktabstand zu wenig Steifigkeit besitzen um einfach auszuknöpfen, biegen sie sich unter Zugbeanspruchung bis zum Fügpunkt auf (siehe Abb. 6.20). Bei weiterer Belastung verdreht sich der noch vorhandene Überlappungsbereich in Richtung stempelseitiges Blech. Nach Versagen beträgt dieser Winkel statt 90° nur noch ca. 75° . Es ist daher anzunehmen, dass zum Versagen ein zusätzlicher Schub-Anteil aus der Verdrehung die höhere Höchstzugkraft verursacht. Durch die Richtung der Verdrehung ist außerdem anzunehmen, dass die Geometrie des Hinterschnittes zwischen den Blechen für diese Verdrehung verantwortlich ist. Eine weitere Untersuchung dieses Ablaufes ist aus Zeitgründen nicht möglich.

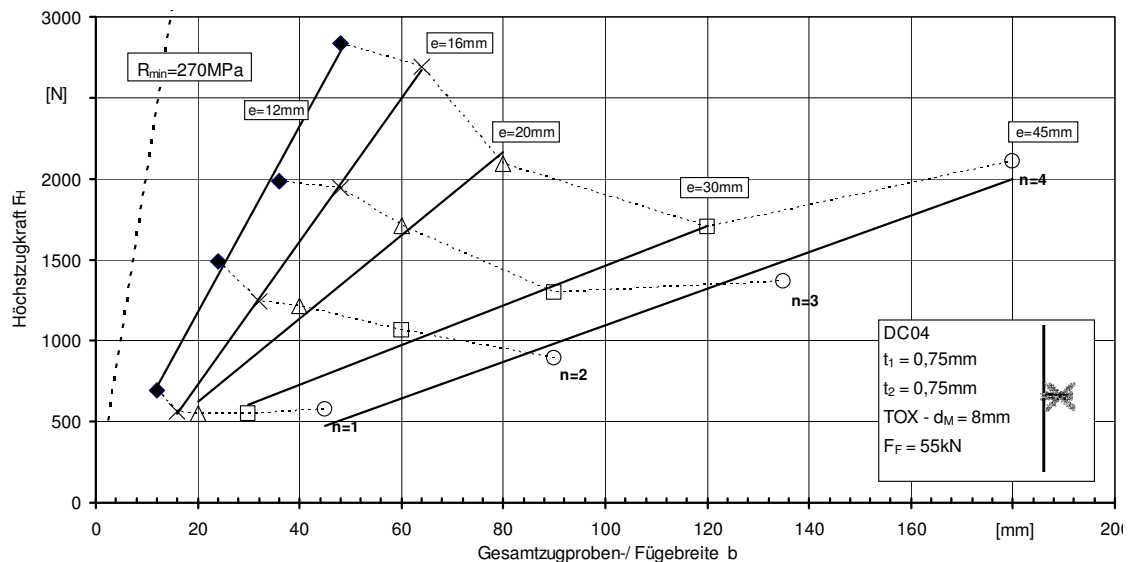


Abb. 6.19: Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 0,75/0,75 unter Schälzugbeanspruchung

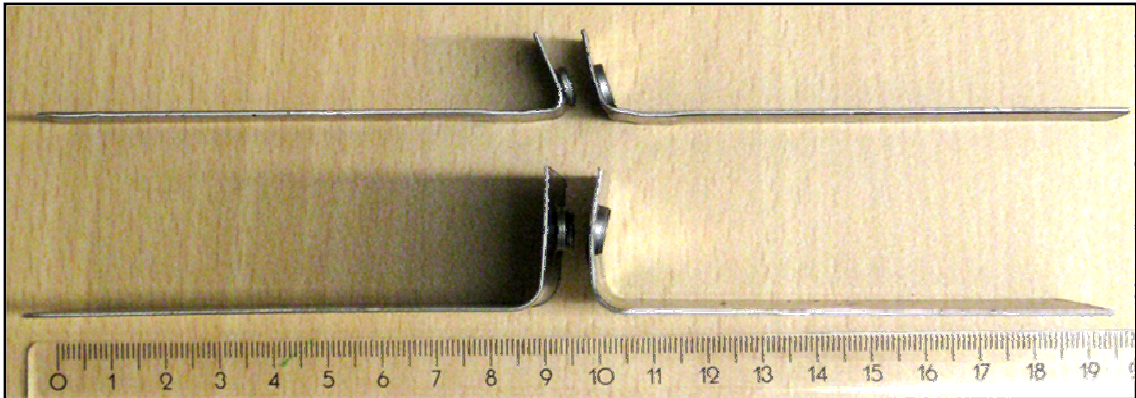


Abb. 6.20: Zugproben Versuchsreihe 0,75/0,75; oben: $e=20\text{mm}$, $n=3$, Überlappungsbe-
reich aufgebogen bis zu den Fügepunkten; unten: $e=45\text{mm}$, $n=2$, Probe kaum
verbogen

Im direkten Vergleich der Fügepunkte, der stempelseitigen Bleche, ist sich gut erkenn-
bar, dass die Fügepunkte, die mit einem Punktabstand bis $e=20\text{mm}$ gefügt wurden, star-
ke Riefen, also Verformung am Punkt aufweisen. Für größere Punktabstände z.B.
 $e = 45\text{ mm}$ wirkt der Fügepunkt fast unbeschädigt (siehe Abb. 6.21).



Abb. 6.21: Schadensbild der Zugproben, stempelseitiges Blech; Links: $e=20\text{mm}$, $n=3$,
Riefen gut erkennbar; Rechts: $e=45\text{mm}$, $n=2$, Ausknöpfen ohne Schaden;
Mitte: direkter Vergleich der beiden Zugproben

Durch die spezielle Form dieses Festigkeitseigenschaftsfeldes kann davon abgesehen
werden, dass diese Blechdicke unter Schälzugbeanspruchung einer Beschreibung
durch eine Sättigungsfunktion in Frage kommt.

Versuchsreihe 1,5/0,75:

Für die Beschreibung der Messpunkte der Versuchsreihe 1,5/0,75 unter Scherzugbeanspruchung (siehe Abb. 6.22) könnte auch eine Sättigungsfunktion in Frage kommen.

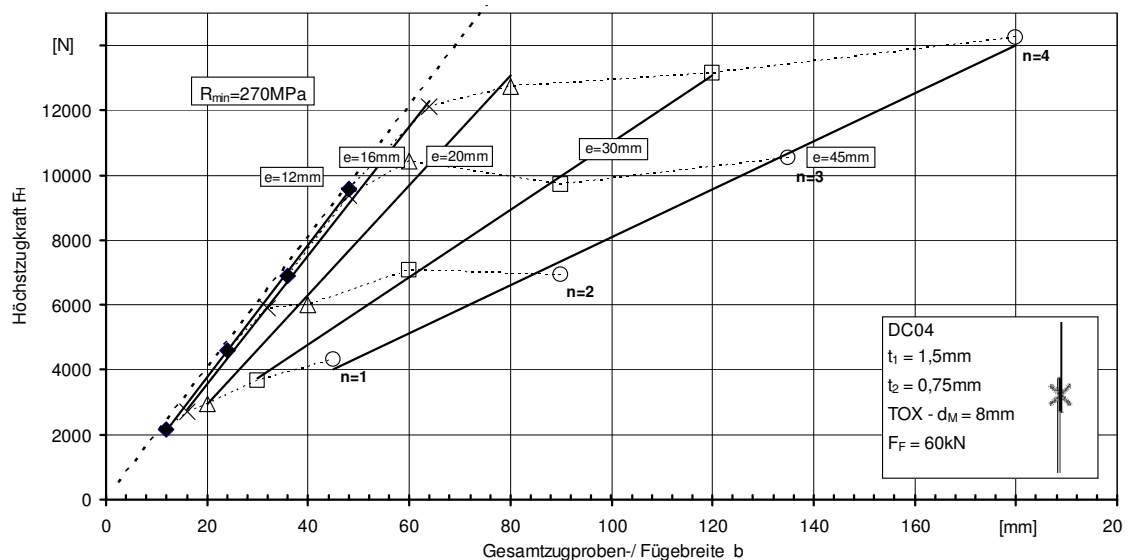


Abb. 6.22: Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 1,5/0,75 unter Scherzugbeanspruchung

Die grafische Darstellung unter Schälzugbeanspruchung (siehe Abb. 6.25) ähnelt der Versuchsreihe 0,75/0,75 unter Schälzugbeanspruchung (siehe Abb. 6.19). In diesem Fall hat wieder das matrizenseitige Blech die Dicke $t_2=0,75\text{mm}$. Der Matrizendurchmesser beträgt ebenso $d_M=8\text{mm}$. Auch hier tritt der Effekt der Verdrehung am Fügepunkt für kleine Punktabstände auf (siehe Abb. 6.23). Allerdings ist die Richtung der Verdrehung zum matrizenseitigen Blech gerichtet. Diese Richtungsänderung kann damit erklärt werden, dass das stempelseitige Blech durch die Dicke von $t_1=1,5\text{mm}$ eine größere Steifigkeit besitzt. In diesem Fall beträgt der Winkel nach dem Versagen ca. 55° . Prinzipiell sind die Wirkmechanismen die gleichen wie bei der Versuchsreihe 0,75/0,75. Doch auch hier kann eine weitere Untersuchung aus Zeitgründen nicht erfolgen. Die Verformungen an den Fügepunkten stehen wieder in direktem Zusammenhang mit der Höchstzugkraft (siehe Abb. 6.24).

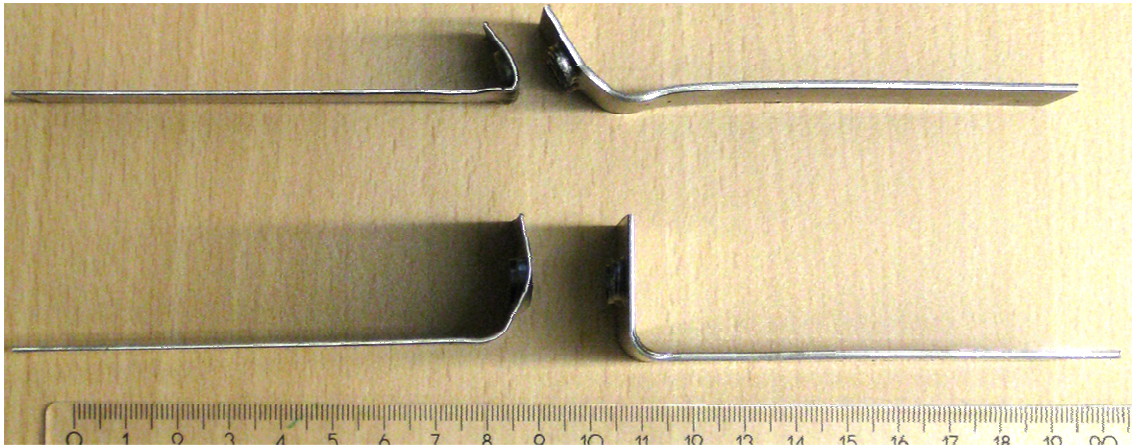


Abb. 6.23: Zugproben Versuchsreihe 1,5/0,75; Oben: $e=16\text{mm}$, $n=4$, Überlappungsbereich aufgebogen bis zu den Fügepunkten; Unten: $e=45\text{mm}$, $n=2$, Probe kaum verbogen

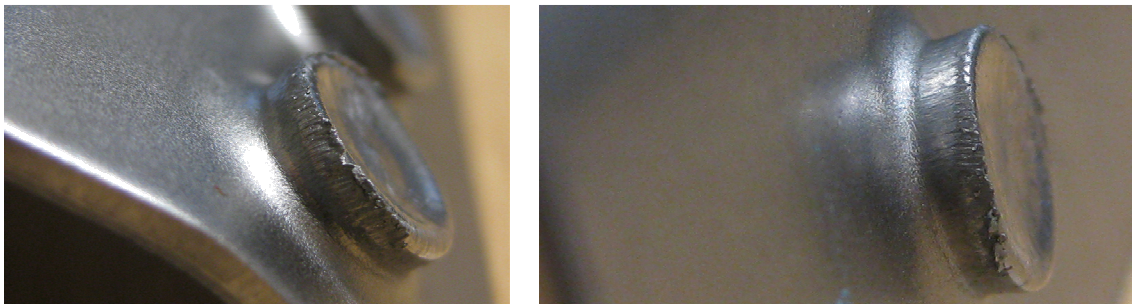


Abb. 6.24: Schadensbild der Zugproben, stempelseitiges Blech; Links: $e=16\text{mm}$, $n=3$, Riefen gut erkennbar; Rechts: $e=45\text{mm}$, $n=2$, Ausknöpfen mit wenig Verformung

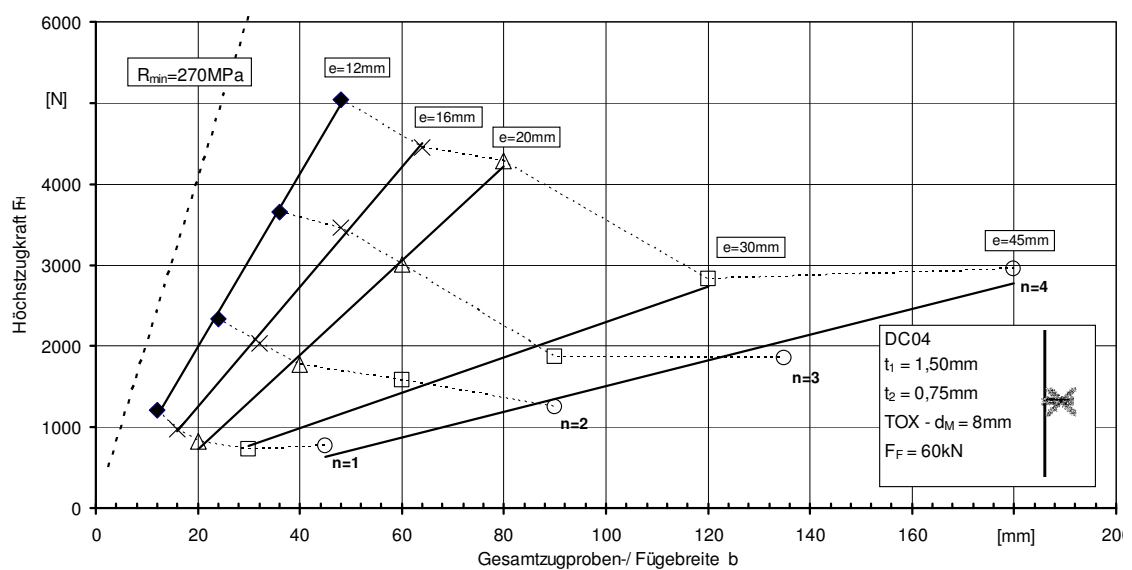


Abb. 6.25: Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 1,5/0,75 unter Schälzugbeanspruchung

Versuchsreihe 0,75/1,5:

Abgesehen von einzelnen Messpunkten im Festigkeitseigenschaftsbild (siehe Abb. 6.26), könnte auch hier wieder eine Sättigungsfunktion den Kurvenverlauf für die Messpunkte gleicher Punkanzahlen beschreiben. Abgesehen von den Zugproben mit $e=16\text{mm}$ passen sich die Messwerte gut im Diagramm ein. Auffallend ist, dass bei dieser Versuchsreihe die Standardabweichung mit der Punkanzahl zunimmt (siehe Abb. 6.27). Demzufolge scheint bei dieser Versuchsreihe ein Zusammenhang zwischen Standardabweichung und Punkanzahl vorzuliegen.

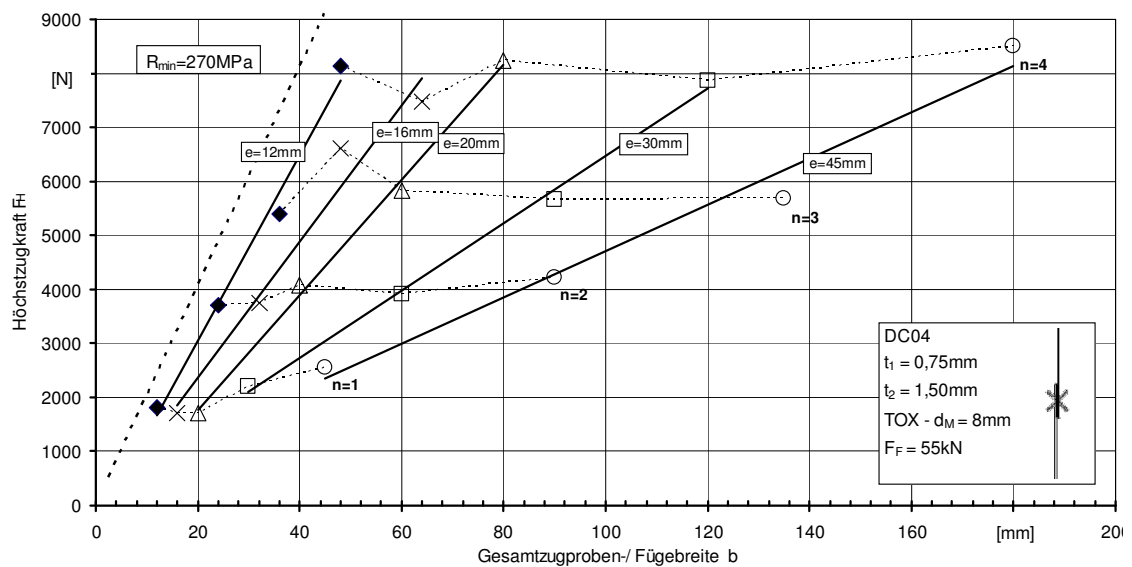


Abb. 6.26: Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 0,75/1,5 unter Scherzugbeanspruchung

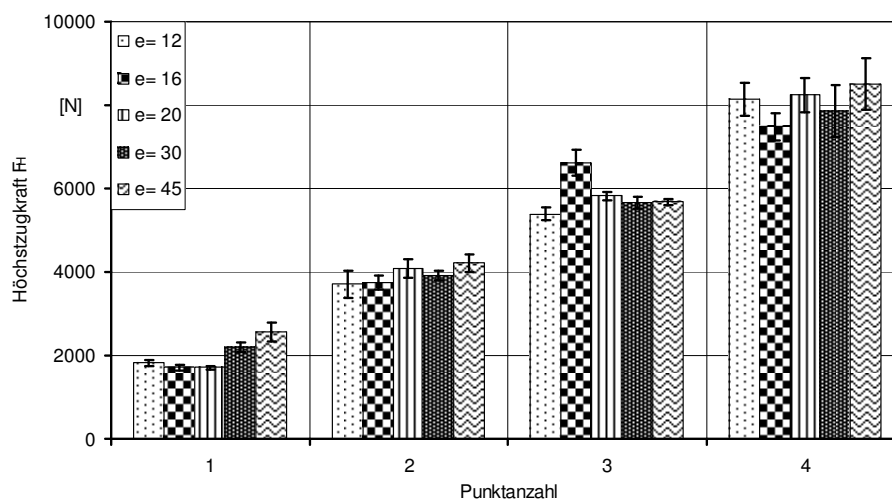


Abb. 6.27: Säulendiagramm für die Höchstzugkräfte der Versuchsreihe 1,5/0,75 mit Standardabweichung unter Scherzugbeanspruchung

Im Prinzip verhalten sich die Höchstzugwerte im Festigkeitseigenschaftsfeld (Abb. 6.28) für gleiche Punktabstände bis auf wenige Ausnahmen linear, denn ein Anstieg (Anfangsbereich einer Sättigungsfunktion) ist nicht eindeutig erkennbar. Eventuell liegt der Anstieg außerhalb des untersuchten Bereiches (unter $e=12\text{mm}$). In diesem Fall kann die Sättigungsfunktion zur Beschreibung des Kurvenverlaufes genutzt werden, wenn der Anstieg steil genug gewählt wird.

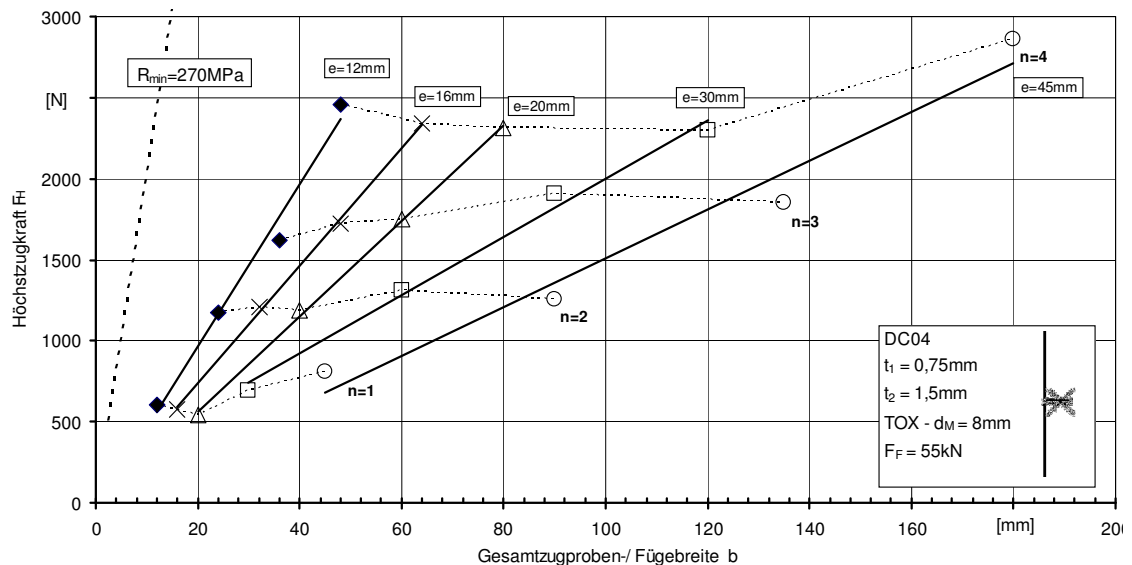


Abb. 6.28: Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 0,75/1,5 unter Schälzugbeanspruchung

Versuchsreihe 2,5/2,5:

Die Höchstzugwerte der Proben gleicher Punktzahlen im Festigkeitseigenschaftsfeld (Abb. 6.29) verhalten sich sehr konstant und weisen darüber hinaus eine sehr geringe Standardabweichung. Der Grund dafür lässt sich im Versagensbild erkennen. Die Verbindungen aller Zugproben weisen reines Abscheren als Versagen auf, es sind keine nennbaren Verformungen an den Probenblechen festzustellen. Dies ist auf die Blechdicke von $t_1=t_2=2,5\text{mm}$ und die damit verbundene, hohe Blechsteifigkeit zurückzuführen. Da die Höchstzugkräfte für die gleichen Punktzahlen relativ konstante Werte auch mit steigendem Punktabstand aufweisen, kommt eine Sättigungsfunktion im untersuchten Bereich als beschreibende Funktion auch hier in Frage.

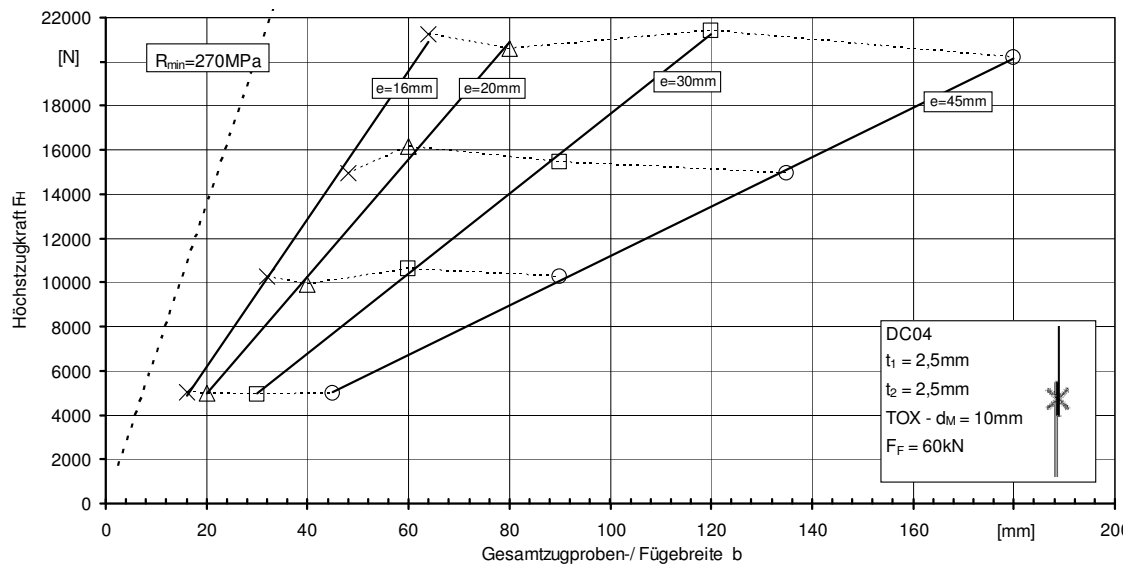


Abb. 6.29: Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 2,5/2,5 unter Scherzugbeanspruchung

Die Höchstzugwerte für gleiche Punktzahl werden, für steigenden Punktabstand, prinzipiell größer (siehe Abb. 6.30), allerdings fallen die Werte für $e = 45\text{mm}$ wieder etwas ab. Es ist auch auffällig, dass die Höchstzugkräfte für $e = 45\text{mm}$ eine, mit der Punktzahl, steigende Standardabweichung aufweist.

Dieses Verhalten lässt sich damit erklären, dass für den Punktabstand $e = 45\text{mm}$ teilweise Halsabrisse als Versagen zu verzeichnen sind, welche die größeren Höchstzugkräfte verursachen.

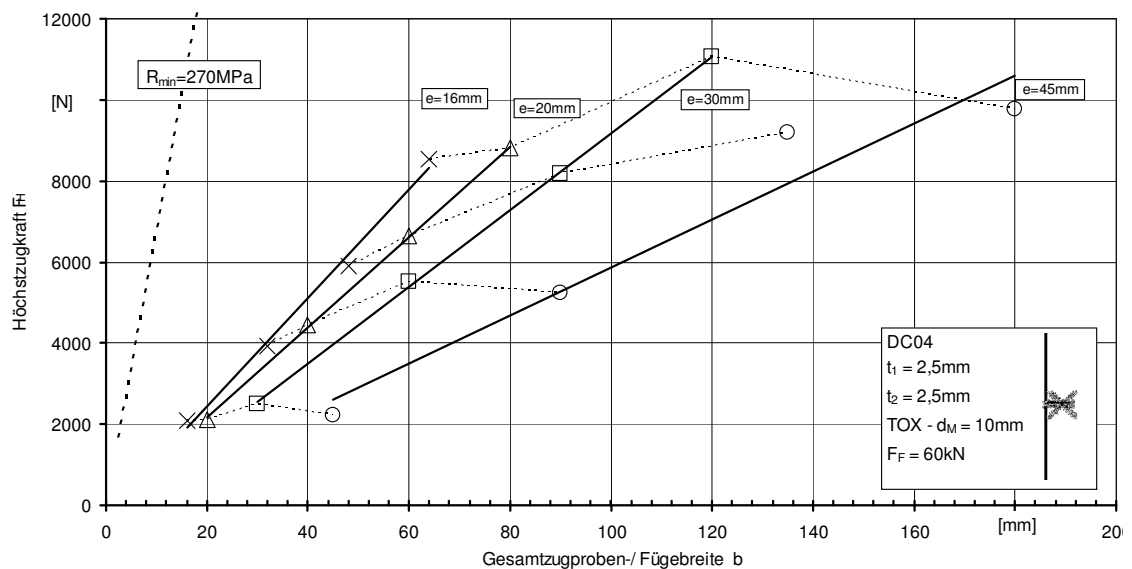


Abb. 6.30: Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 2,5/2,5 unter Schälzugbeanspruchung

Versuchsreihe 1,25/2,5:

Bei dieser Versuchsreihe lässt sich unter Scherzugbeanspruchung (Abb. 6.31) bis zum Punktabstand $e = 30\text{mm}$ ein leichter Anstieg der Höchstzugkraft verzeichnen. Für $e = 45\text{mm}$ fällt die Höchstzugkraft wieder etwas ab. Auch hier steigt für alle untersuchten Punktabstände die Standardabweichung mit der Punktzahl an. Es kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob eine Sättigungsfunktion den Kurvenverlauf beschreiben könnte, da der Anstieg der Kurve sehr gering ist und der weitere Verlauf für $e > 45\text{mm}$ weiter abfallend sein könnte, obwohl man diese Möglichkeit als gering einschätzen kann.

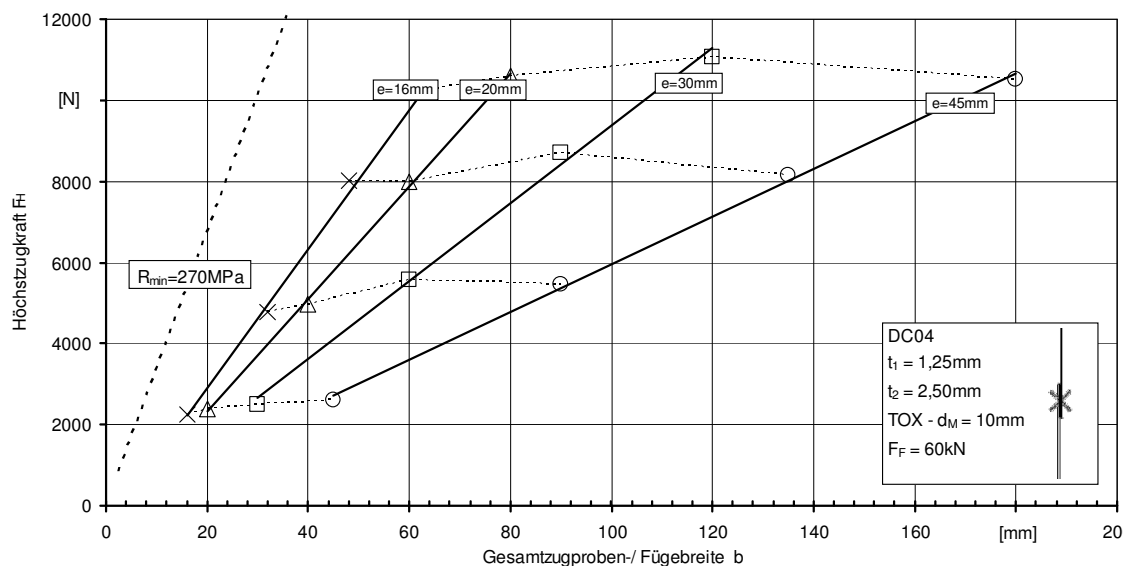


Abb. 6.31: Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 1,25/2,5 unter Scherzugbeanspruchung

Es ist auffällig, dass die Höchstzugwerte für die Zugproben unter Schälzugbeanspruchung (siehe Abb. 6.32) mit einer Gesamtbreite $b > 120\text{ mm}$ viel niedriger ausfallen als zu erwarten gewesen wäre. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass dies auf die Herstellung der Zugproben zurückzuführen ist, denn das Aufbiegen der Schälzugproben bei einer solchen Breite war mit unseren Methoden schwierig zu bewerkstelligen. Das Hauptproblem lag vor allem an den zwei, sehr unterschiedlichen Blechsteifigkeiten.

Wenn man diese Messpunkte außer Acht lässt, könnten diese Kurven von einer Sättigungsfunktion beschrieben werden. Wenn man allerdings den einzelnen Verlauf der Kurven für gleiche Punktzahlen betrachtet wird schnell klar, dass man schon allein für diese Grafik 4 verschiedene Sättigungsfunktionen bräuchte um die 4 Kurven zu beschreiben. Man kann daher davon ausgehen, dass es für die Kurven dieser Grafik

keine allgemeine, analytische Funktion zum beschreiben des Kurvenverlaufes geben kann.

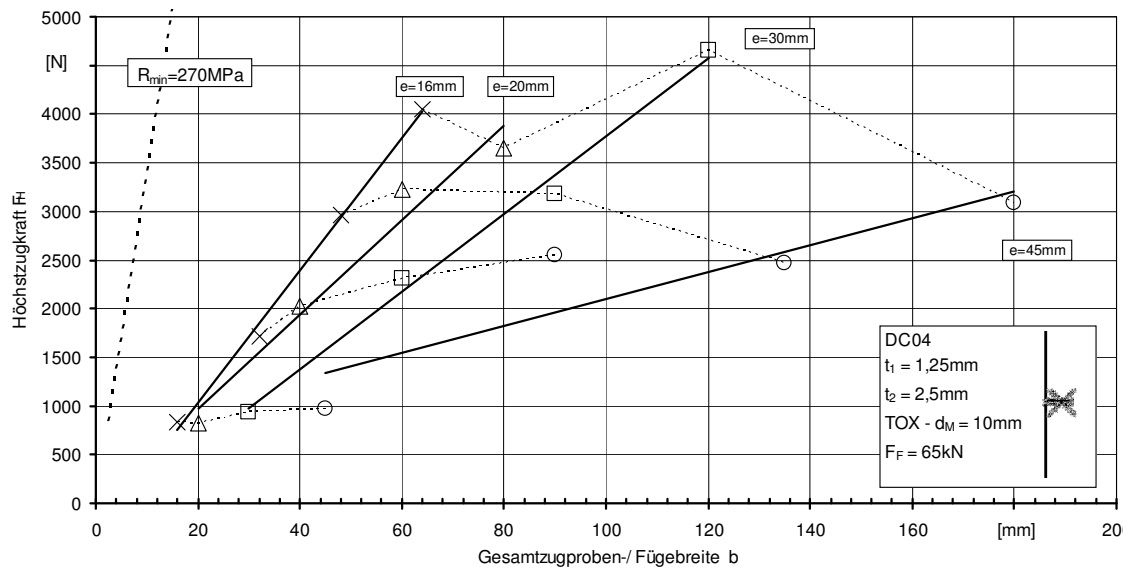


Abb. 6.32: Festigkeitseigenschaftsfeld Versuchsreihe 1,25/2,5 unter Schälzugbeanspruchung

Das Verhalten der Festigkeitseigenschaftsfelder für Schälzugbeanspruchung ist bei den einzelnen Versuchsreihen sehr unterschiedlich. Aus diesem Grund wird von einer beschreibenden Funktion allgemein für alle untersuchten Versuchsreihen sowie Beanspruchungsrichtungen Abstand genommen.

Für die Festigkeitseigenschaftsfelder für Scherzugbeanspruchung scheint eine Sättigungsfunktion der richtige Ansatz einer beschreibenden Funktion zu sein. Diesem Ansatz soll im folgenden Kapitel (siehe Absatz 6.4) nachgegangen werden. Die Tauglichkeit einer passenden Funktion soll am Beispiel der Blechdicken 0,75/0,75; 1,5/1,5 und 2,5/2,5 diskutiert werden.

6.4 Auswertung des analytischen Berechnungsansatzes

Wie in Absatz 2.2.3 beschrieben, besteht ein möglicher Lösungsansatz darin, dass man den gesamten Verbindungsbereich zusammenfasst und diesem Bereich einheitliche Eigenschaften zuschreibt (Abb. 2.6). Dadurch würden die speziellen Eigenschaften der Verbindungen über eine bestimmte Gesamtlänge zusammengefasst und ihr ersatzweise eine ertragbare Spannung einbeschreiben. Dabei spielt die eigentliche Verbindung (ob z. B. Clinch-, Blindniet- oder Vollstanznietverbindung) nur noch eine untergeordnete Rolle, nämlich die unterschiedlichen Grenznahtkurven für die jeweilige Verbindung und die daraus resultierenden ertragbaren Höchstspannungen.

Ausgangsdaten sind die Messergebnisse der Zugproben. Es wurden je Versuchsreihe 4 unterschiedliche Verbindungsanzahlen ($n=1, 2; 3; 4$) und 5 Abstände ($e=12; 16; 20; 30; 45$) untersucht. Daraus resultieren 20 Messpunkte die je fünf mal gemessen wurden. Ziel des Lösungsansatzes ist es, mithilfe mathematischer Methoden die Anzahl der Messungen zu senken, allerdings bei gleich bleibender Genauigkeit der Gitterpunkte. Die Proben erhalten Clinchverbindungen in regelmäßigem Abstand. D. h.:

$$b = n \cdot e \quad (6.5)$$

Für ein festes e ist $F(n,b)$ linear.

Es existiert also eine lineare Funktion $f(x) = m \cdot x$, mit m_{\max} , unter der alle $F(n,b)$ liegen, da die erreichbare Zugkraft einer festen Probenbreite durch das jeweilige Material und der Verbindung beschränkt ist (siehe Abb. 6.33).

Der Wert m_{\max} ist eine werkstoffbezogene Kenngröße die für eine bestimmte Blechdicke die Höchstzugkraft in Abhängigkeit der Probenbreite darstellt. Für jedes n ist $F(n,b)$ beschränkt, da jeder Verbindungspunkt nur eine begrenzte Kraft aufnehmen kann.

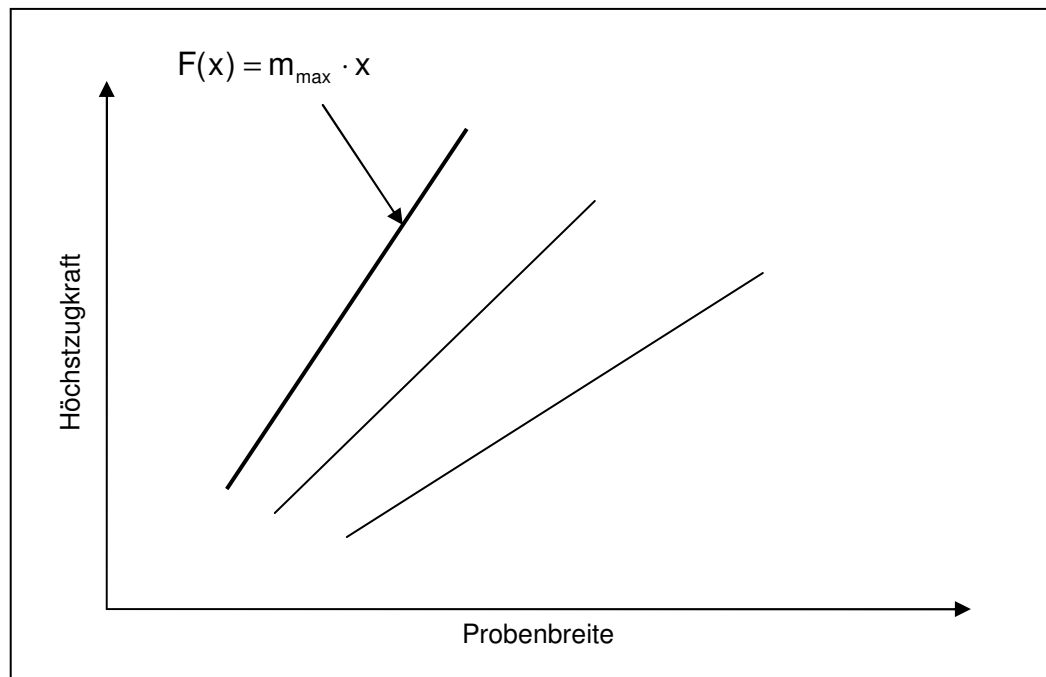


Abb. 6.33: Qualitative Darstellung m_{\max}

Als Referenzfunktion, die den Zusammenhang zwischen Höchstzugkraft und Probenbreite in Abhängigkeit der Punktzahl am besten beschreibt, wurde, wie im Abschnitt 6.3 schon vermutet, eine Sättigungsfunktion ausgewählt. Die Referenzfunktion verbindet die Gitterpunkte gleicher Punktzahl für die unterschiedlichen Punktabstände. Der genaue Typ bezeichnet sich als \tanh (Tangens Hyperbolicus).

$$F(n,b) = a \cdot \tanh\left(u \cdot \frac{b}{n}\right) \quad (6.7)$$

wobei gilt:

$$a \rightarrow F_{\max,n} \quad (6.8)$$

$$u = \frac{m}{a} \quad (6.9)$$

daraus ergibt sich:

$$F(n,b) = F_{\max,n} \cdot \tanh\left(\frac{m}{F_{\max,n}} \cdot \frac{b}{n^2}\right) \quad (6.10)$$

Da der Anstieg m aber nicht praktisch ermittelt werden kann, muss es nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate⁵ numerisch erfolgen. Der Höchstwert a kann als F_{\max} direkt aus den Messdaten abgelesen werden (mit a ist hier nicht der Auslastungsgrad gemeint, der Faktor a stammt aus der Ursprungsgleichung der Referenzfunktion und steht in diesem Kontext für die Höchstzugkraft).

Da die Messdaten der Höchstzugkräfte bei konstantem e für die unterschiedlichen Punktzahlen aber nicht immer monoton steigend sind, ist die Abweichung größer als bei der Annahme, dass die Referenzfunktion konstant ist (z. B.: $F(n,b) = n \cdot F_{\max}$).

Im Zuge der experimentellen Ermittlungen realer Messergebnisse wurden insgesamt sechs Versuchsreihen angefertigt. Aus den Ergebnissen dieser Versuchsreihen konnte die Anwendbarkeit der Referenzfunktion auf die Messreihen mit Beschränkung bestätigt werden. Die Gültigkeit der Aussage beschränkt sich auf die Scherzugbeanspruchung. Grafisch nachgewiesen wurde die Funktion mit den Versuchsreihen 0,75/0,75, 1,5/1,5, und 2,5/2,5.

Die gewählte Referenzfunktion ist eine Sättigungsfunktion. Die Beschreibung des realen Verlaufes der Messpunkte durch die Referenzfunktion erfolgt prinzipiell nur durch den Anstieg und den Höchstwert (die Höchstzugkraft). Durch diese Form der Funktion ist es möglich, den realen Verlauf der Messwerte mit nur zwei Messpunkten bestimmen zu können. Die dafür notwendigen Messpunkte sollte ein repräsentativer Punkt der Höchstzugkraft (Höchstwert) mit möglichst hoher Punktzahl (z.B. $e=20\text{mm}$; $n=4$) und ein Messpunkt mit minimalem Punktabstand, für den Wert des Anstieges, sein. Der Messpunkt mit hoher Punktzahl wird empfohlen, da sich die Höchstzugkräfte geringerer Punktzahl genauer durch einen Messpunkt hoher Punktzahl bestimmen lassen als umgekehrt. Diese Tatsache wurde durch Versuche zu dieser Arbeit verifiziert. Die Schwierigkeit bei dieser Funktion liegt nur darin den korrekten Anstieg zu ermitteln, da sonst die Messwerte im Anstiegsbereich nicht korrekt wiedergegeben werden können. Das Problem liegt darin, dass der korrekte Anstieg zur Ermittlung der Funktion größer sein muss, als mit dem geringsten Punktabstand experimentell ermittelt werden kann. Für die untersuchten Blechdicken wurde der korrekte Anstieg durch händische Korrektur ermittelt werden, da je Versuchsreihe 16 – 20 Messpunkte zur Verfügung stehen. Dabei hat sich gezeigt, dass der Zusammenhang der Nachbesserung (der Faktor X + Anstieg geringster Punktabstand) linear zwischen den Blechdi-

⁵ Ist das mathematische Standardverfahren zur Ausgleichsrechnung. Dabei wird zu einer Datenpunktwolke eine Kurve gesucht, die möglichst nahe an den Datenpunkten verläuft. Die Methode der kleinsten Quadrate besteht darin, für die Kurvenparameter so zu bestimmen, dass die Summe der quadratischen Abweichungen der Kurve von den beobachteten Punkten minimiert wird. (Quelle – Wikipedia)

cken 0,75mm und 2,5mm verläuft (siehe Abb. 6.34).

Als Beispiel sind nachstehend Diagramme der Versuchsreihen 0,75/0,75; 1,5/1,5 und 2,5/2,5 aufgeführt (siehe Abb. 6.35 bis Abb. 6.43). Dabei wurden je Versuchsreihe nacheinander folgende Funktionen grafisch dargestellt: Referenzfunktion ermittelt durch interpolierte Höchstzugwerte höchster Punktzahl und interpolierten Anstieg aus Proben mit geringstem Punktabstand; Referenzfunktion ermittelt durch interpolierte Höchstzugwerte höchster Punktzahl und interpolierten Anstieg aus Proben mit geringstem Punktabstand + händisch nachgebessertem Additionswert des Anstieges; Referenzfunktion ermittelt durch Höchstzugwerte höchster Punktzahl für $e = 45\text{mm}$ und Anstieg der Proben mit geringstem Punktabstand der Punktzahl $n=4$. Die zuletzt genannten Diagramme basieren nur auf dem Gedanken die Funktion aus 2 Messpunkten zu erzeugen, daher erfolgte hierbei keine Nachbesserung des Anstieges. In den Diagrammen wurden stets auch die gemittelten Anstiege als lineare Funktion dargestellt. Diese haben für die zuletzt genannten Diagramme, erzeugt aus zwei Messpunkten, keine Bedeutung für die gebildete Referenzfunktion.

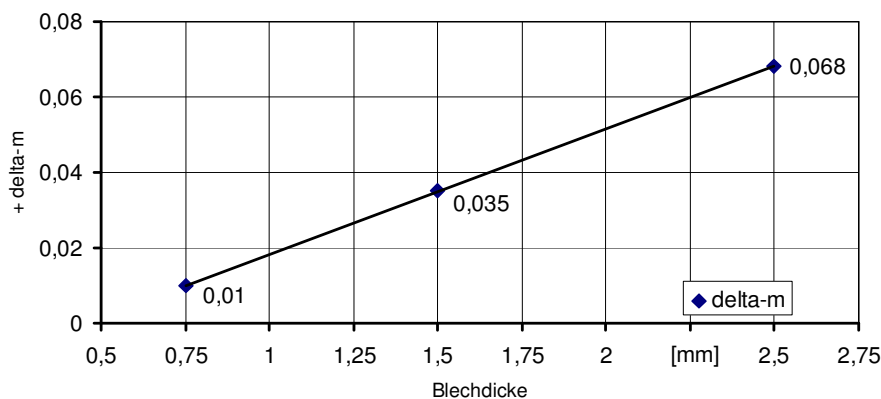


Abb. 6.34: Korrekturwert delta-m für Diagramme der Referenzfunktion mit Anstieg + delta m

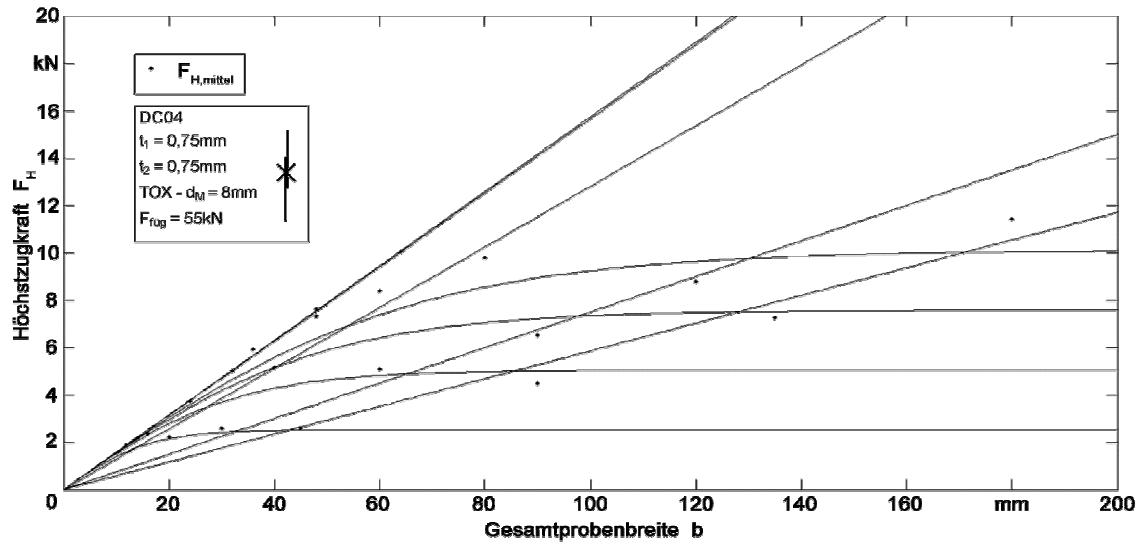


Abb. 6.35: Referenzfunktion 0,75/0,75, normal

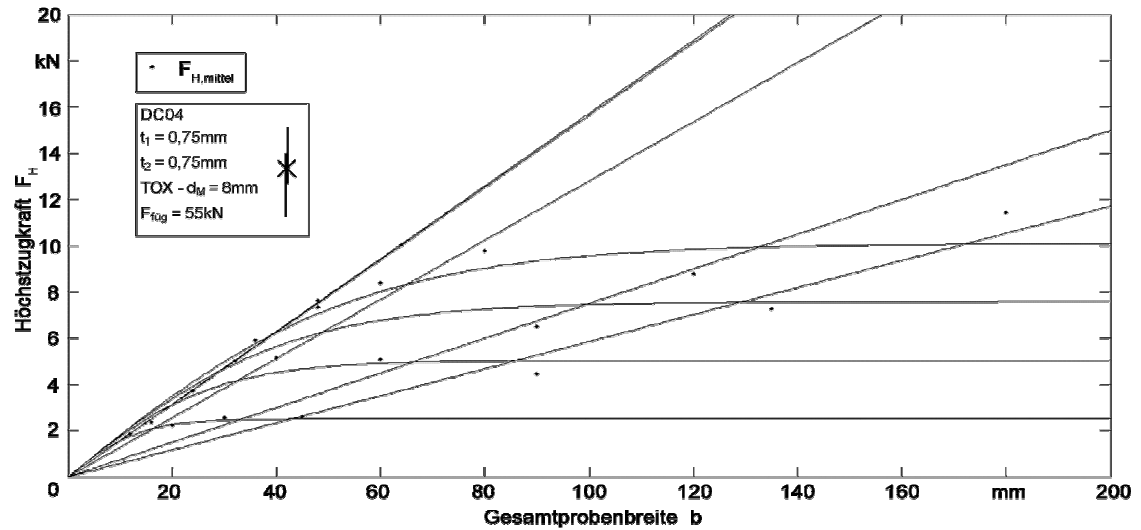


Abb. 6.36: Referenzfunktion 0,75/0,75, erhöhter Anstieg

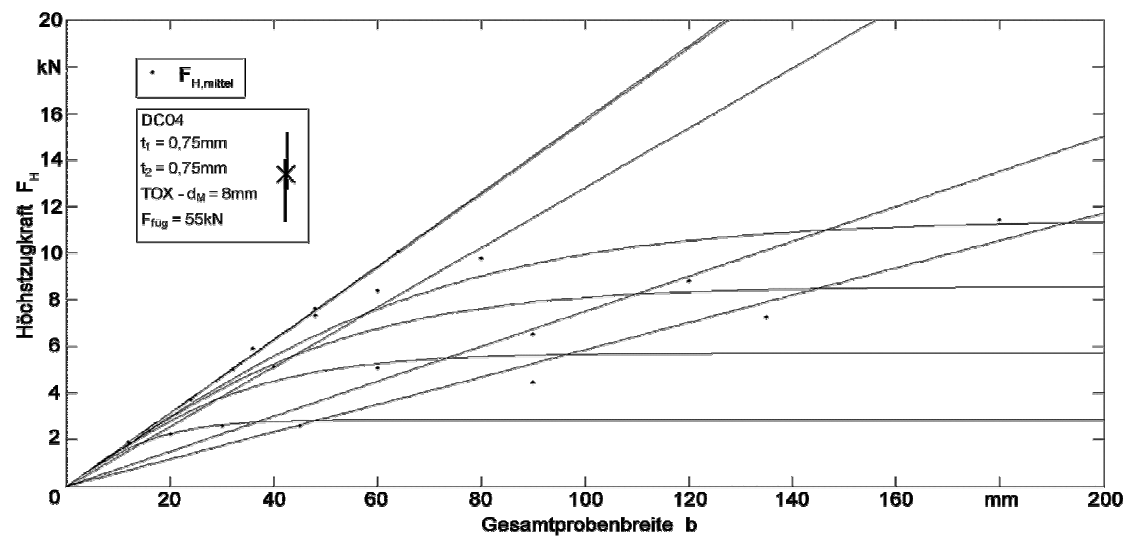


Abb. 6.37: Referenzfunktion 0,75/0,75, 2-Punkt basiert

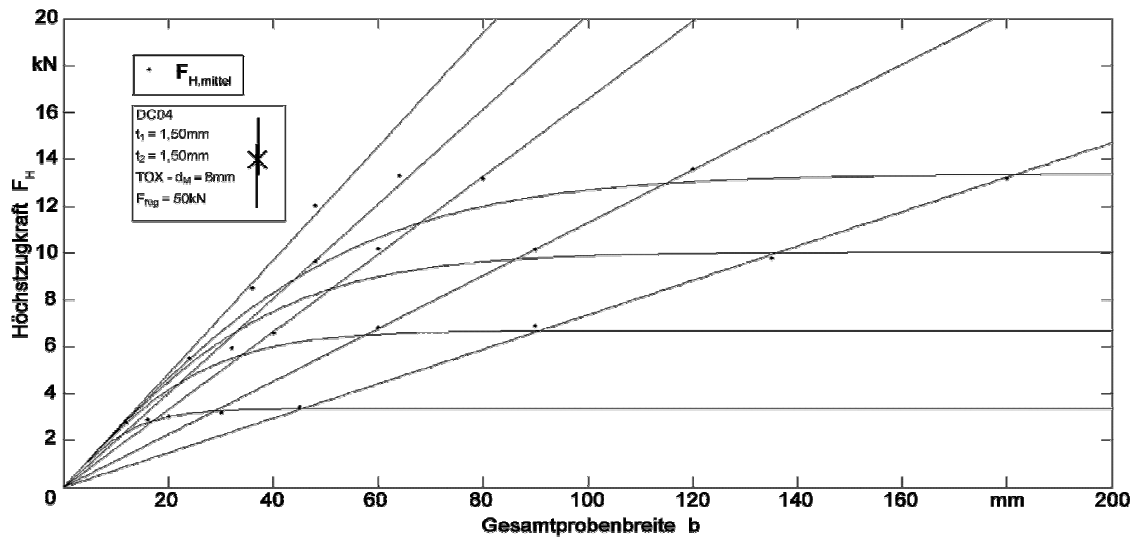


Abb. 6.38: Referenzfunktion 1,5/1,5

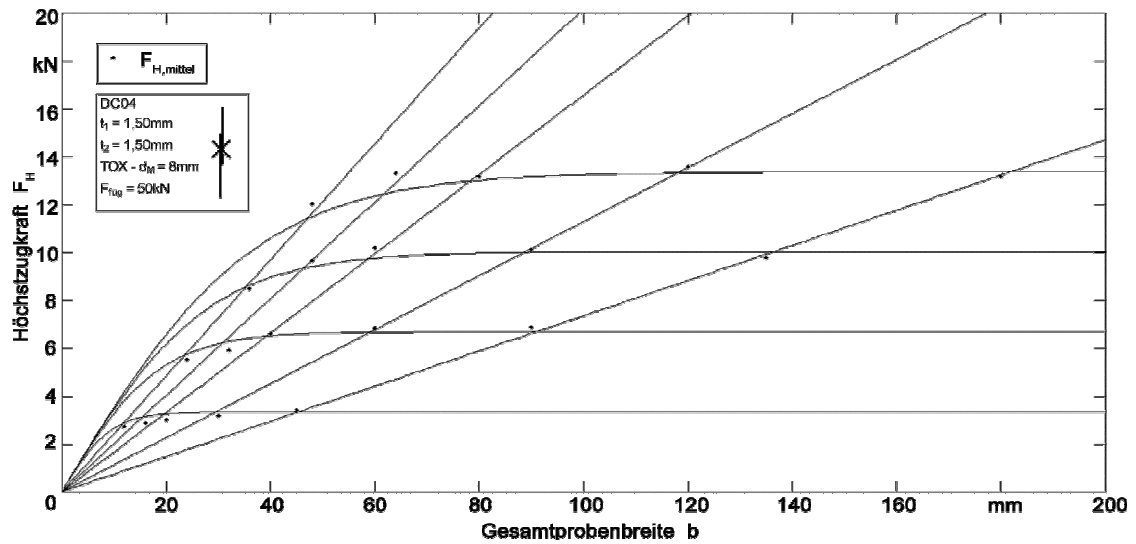


Abb. 6.39: Referenzfunktion 1,5/1,5, erhöhter Anstieg

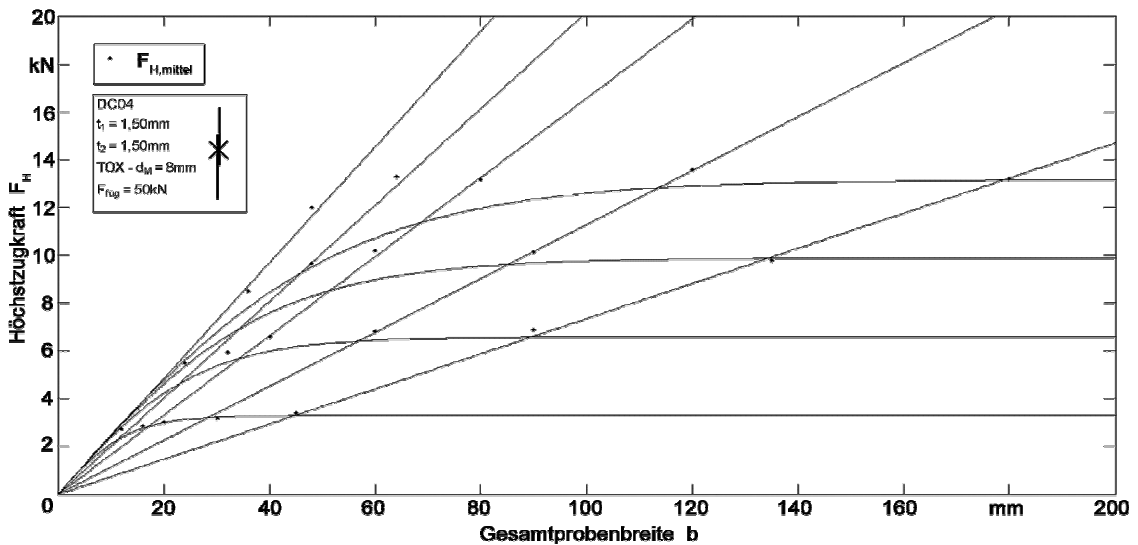


Abb. 6.40: Referenzfunktion 1,5/1,5, 2-Punkt basiert

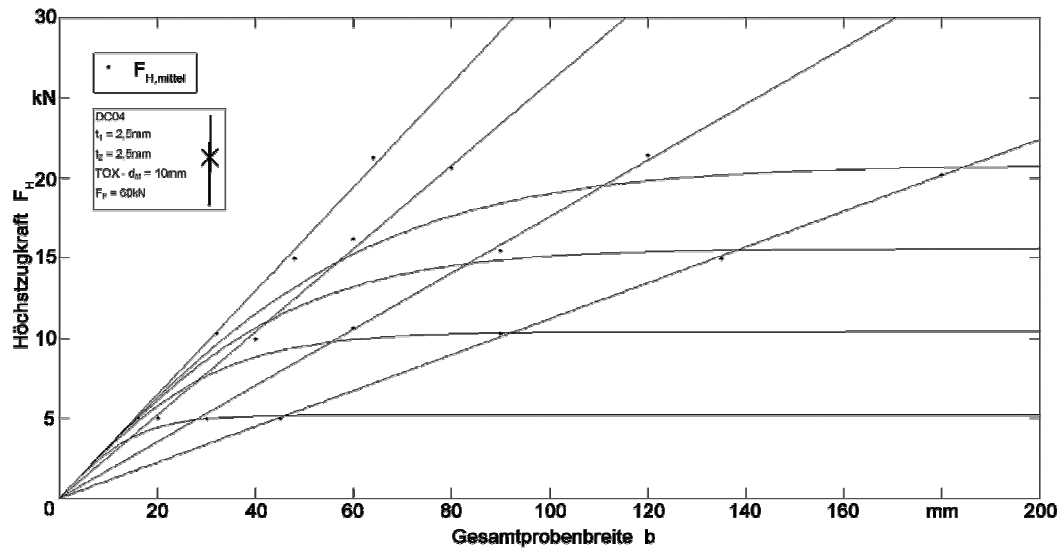


Abb. 6.41: Referenzfunktion 2,5/2,5

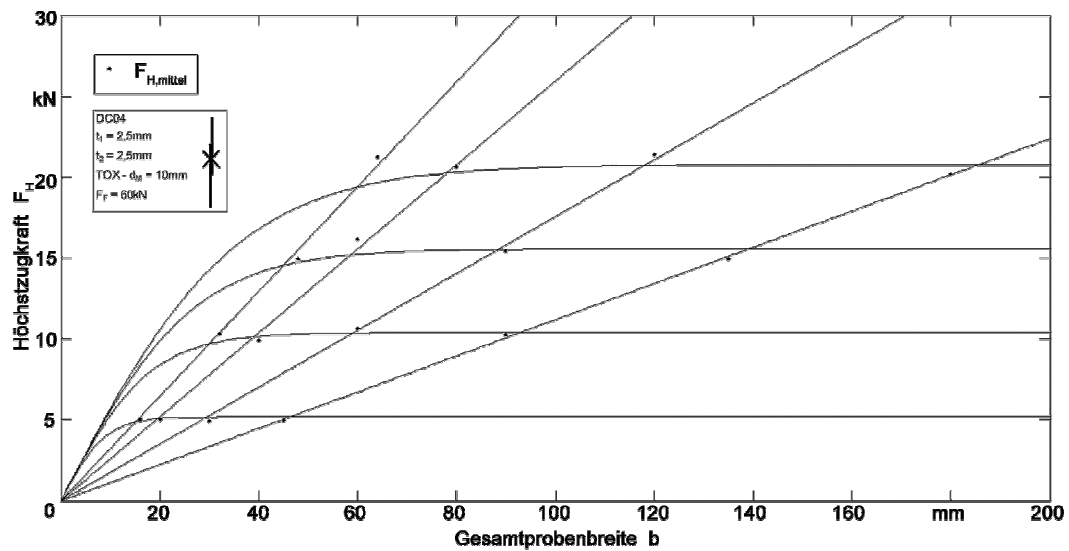


Abb. 6.42: Referenzfunktion 2,5/2,5 , erhöhter Anstieg

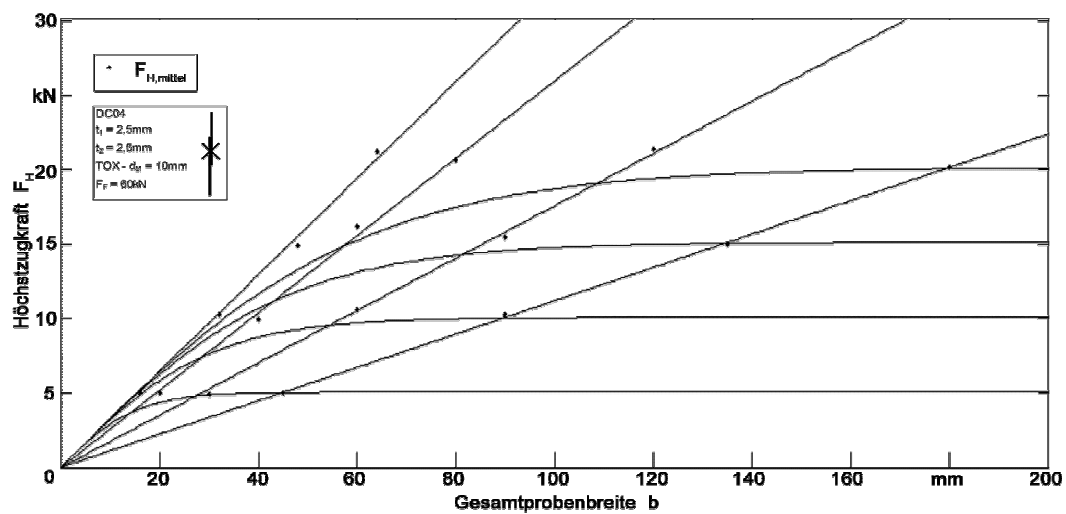


Abb. 6.43: Referenzfunktion 2,5/2,5 , 2-Punkt basiert

Einen guten Aufschluss über die Genauigkeit der Referenzfunktion ist in den Diagrammen der Erwartungswerte ersichtlich (siehe Abb. 6.44 bis Abb. 6.46). In den Diagrammen ist eine Streuung von 10% eingetragen. Da der Großteil der durch die Referenzfunktion ermittelten Werte innerhalb diese Streuung liegen, kann davon ausgegangen werden, dass die Referenzfunktion gut für die Beschreibung der realen Werte geeignet ist.

In der Abb. 6.44 sind die Erwartungswerte für die Versuchsreihe 0,75/0,75 dargestellt. Die erzeugten Werte aus nur 2 Messpunkten liegen teilweise deutlich über 10% über Erwartungswert. Das bedeutet, dass die Werte der Referenzfunktion höher sind als die real ermittelten Messwerte. Das würde eine Überbeanspruchung der Clinchverbindung bedeuten.

Am besten beschreibt die Referenzfunktion ohne Anhebung des Anstieges die realen Messwerte, da keiner der erzeugten Werte über 10% über Erwartungswert liegen.

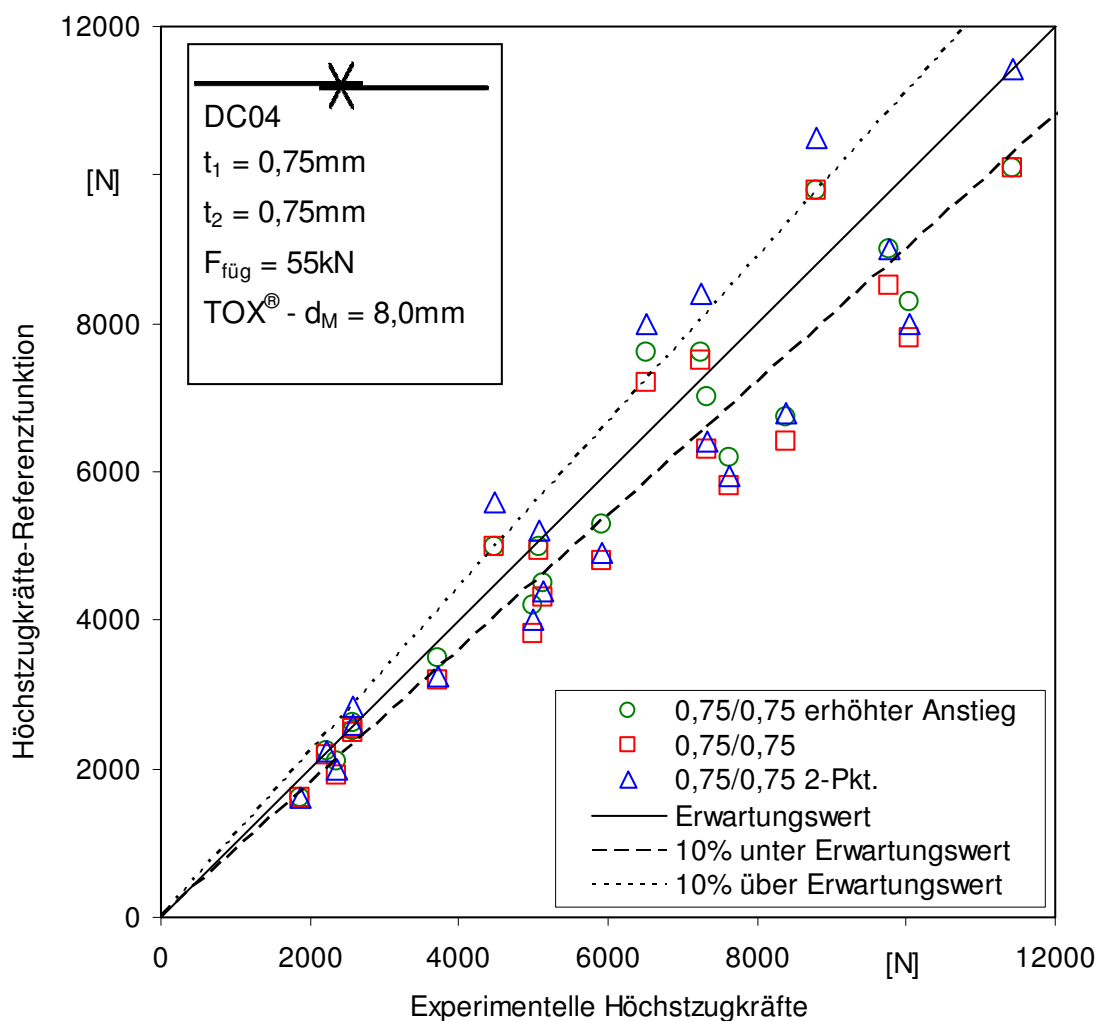


Abb. 6.44: Erwartungswerte der Höchstzugkräfte (reale Messwerte – Referenzfunktionen), Versuchsreihe 0,75/0,75

Generell ist die Streuung der erzeugten Werte bei der Versuchsreihe 0,75/0,75 am größten. Daher ist zu überlegen ob sich eine Beschreibung dieser Versuchsreihe durch die Referenzfunktion eignet.

Abgesehen von der Versuchsreihe 0,75/0,75 trifft die Beschreibung durch die Referenzfunktion für die beiden anderen untersuchten Versuchsreihen gut zu. Oft liegen die erzielten Werte der Höchstzugkraft etwas unter 10% unter Erwartungswert. Dadurch kann eine eventuelle Überbeanspruchung bei der Bemessung der Verbindungen vermieden werden. Die ermittelten Höchstzugwerte durch erhöhten Anstieg der Referenzfunktion liegen nahe am Erwartungswert und innerhalb der 10%-Toleranz.

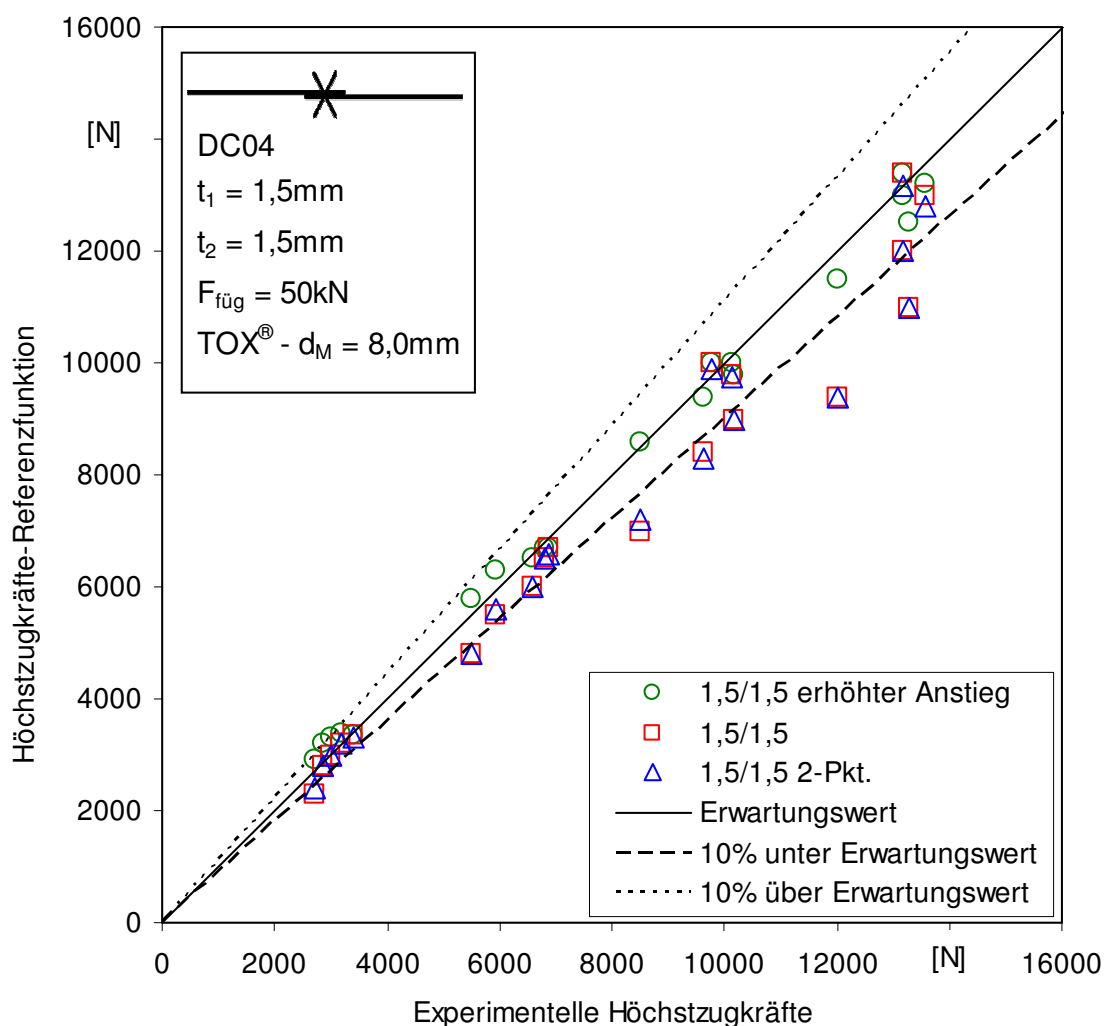


Abb. 6.45: Erwartungswerte der Höchstzugkräfte (reale Messwerte – Referenzfunktionen), Versuchsreihe 1,5/1,5

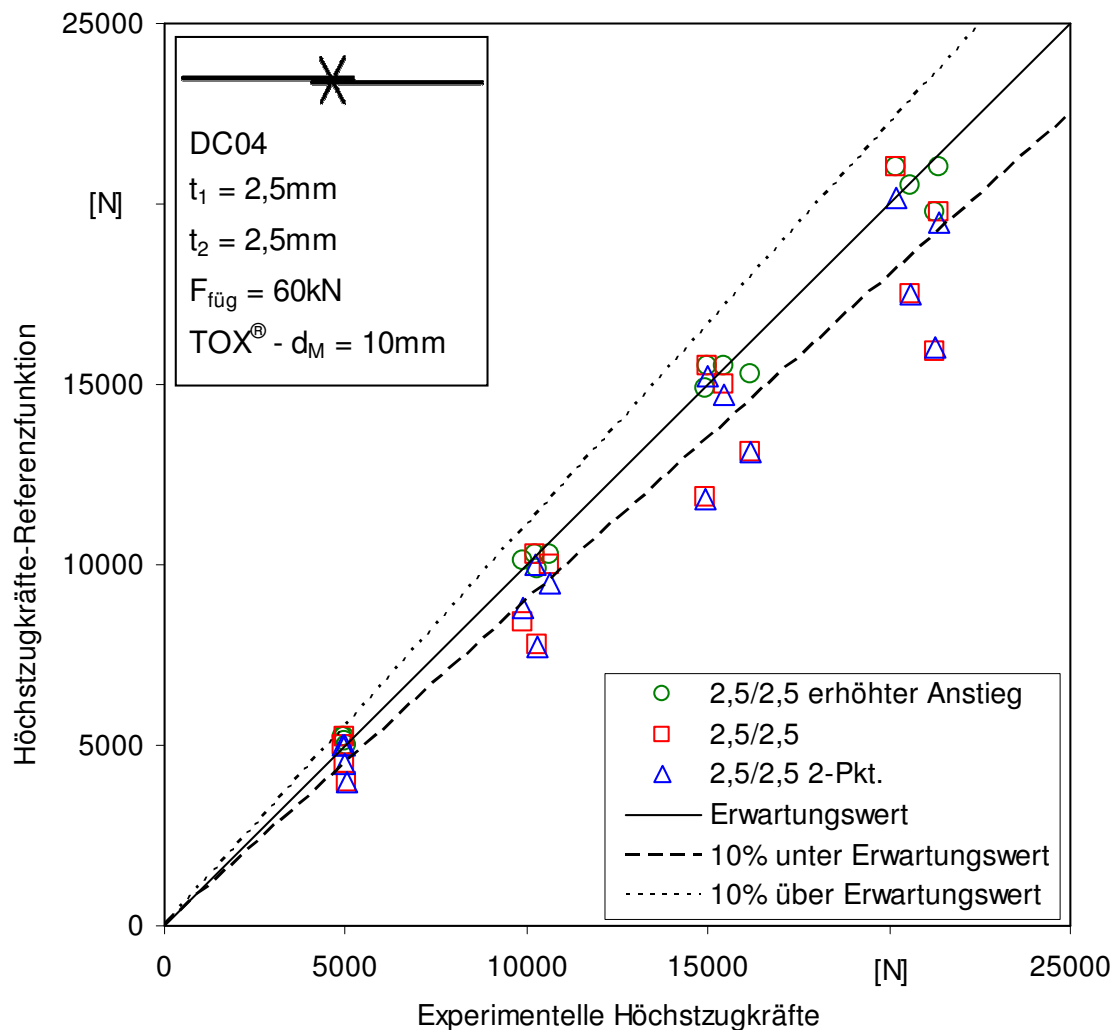


Abb. 6.46: Erwartungswerte der Höchstzugkräfte (reale Messwerte – Referenzfunktionen), Versuchsreihe 2,5/2,5

Abschließend kann festgestellt werden, dass sich, mit Ausnahme der Versuchsreihe 0,75/0,75, die Referenzfunktion mit erhöhtem Anstieg sehr gut eignet um die realen Messwerte zu beschreiben. Ein Einsatz der Referenzfunktion, die durch 2 reale Messpunkte erzeugt wird, wäre durchaus auch denkbar. Die erzielten Höchstzugwerte liegen dabei bis ca. 20% unter dem Erwartungswert. Eine Überbeanspruchung der Verbindungen kann damit vermieden werden. Angesichts der Tatsache, dass die Streuung der einzelnen, realen Messwerte bereits 13% Abweichung vom Mittelwert haben, relativieren sich die 20% Abweichung unter Erwartungswert.

Die Grenznahtfestigkeitsfunktion geht direkt auf die Höchstzugkraft aus dem Festigkeitseigenschaftsfeld zurück. Somit kann bestätigt werden, dass sich mit der Referenzfunktion eine gute Grundlage zur Berechnung von Grenznahtfestigkeitskurven für Clinchverbindungen finden ließ. Mithilfe dieser Funktion ist die Berechnung der Grenznahtfestigkeitskurven mit nur zwei realen Messpunkten möglich. Die Anwendung sollte eventuell eingeschränkt werden für $t_1, t_2 > 1,0\text{mm}$.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Clinchen ist mittlerweile zu einem wirtschaftlichen Fügeverfahren entwickelt worden und hat das Widerstandspunktschweißen in bestimmten Anwendungsgebieten bereits abgelöst. Die Auslegung von Clinchverbindungen erfolgt aber immer noch auf Basis einer maximal übertragbaren Kraft für die Einzelverbindungsunkte. Um die Auslegung von Clinchverbindungen zu vereinfachen und das Clinchen auch für kleine- und mittelständische Betriebe wirtschaftlich nutzbar zu machen, wird im Rahmen des Konstruktionssystems eine spannungsbasierte Berechnungsgrundlage für punktförmig, mechanisch gefügte Verbindungen entwickelt. In dieser Arbeit wurden speziell Untersuchungen zum einstufigen Clinchen mit starrer Matrice durchgeführt. Der untersuchte Werkstoff ist der Tiefziehstahl DC04. Dabei wurde die Festigkeit für unterschiedliche Blechdickenkombinationen und Beanspruchungsrichtungen untersucht.

Bei den Versuchen zur Ermittlung einer Referenzfunktion für die Grenznahtkurven von Clinchverbindungen konnten konkrete Fortschritte gemacht werden. Als Grundlage wurden die Höchstzugkräfte der Clinchproben genutzt. Die Clinchproben wurden systematisch für verschiedene Clinchverbindungsanzahlen ($1 < n < 4$) und Clinchverbindungsabstände ($e = 12, 16, 20, 30, 45$) gefertigt. Die Höchstzugkraft wurde im quasistatischen Zugversuch ermittelt. Die Clinchproben wurden für Scherzug- und Schälzugbeanspruchung gefertigt und geprüft. Bei der Auswertung der Versuchsreihen konnten verschiedene Abhängigkeiten der Höchstzugkraft von der Blechdicke, dem Blechdickenverhältnis, der Beanspruchungsrichtung, der Mittigkeit der Clinchverbindungen bezogen auf die Überlappungslänge und dem Einfluss der Verformung bei der zerstörenden Zugprüfung ermittelt werden. Es konnte eine mögliche Referenzfunktion gefunden werden, mit der die Anzahl der nötigen experimentellen Messpunkte auf ein Minimum beschränkt werden kann.

Im Zugversuch konnte festgestellt werden, dass die Verformung, die beim Versagen der Verbindung auftritt, einen direkten Einfluss auf die Höchstzugkraft hat. Durch unterschiedliche Verformung beim Versagen der gleichen Verbindungen konnten Abweichungen von ca. 13% vom Erwartungswert der Höchstzugkraft festgestellt werden. Diese Abweichungen können für Clinchverbindungen aber als normale Streuung der Messwerte angesehen werden.

Bei der Untersuchung der Abhängigkeit der Höchstzugkraft von der Blechdicke konnte ein direkter Zusammenhang festgestellt werden. Allgemein kann ausgesagt werden, dass mit zunehmender Blechdicke die Höchstzugkraft zunimmt. Unter Scherzugbeanspruchung ist dieser Zusammenhang nicht linear. Unter Schälzugbeanspruchung kann

ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen Blechdicke und Höchstzugkraft festgestellt werden.

Das Blechdickenverhältnis ist der Quotienten aus oberer Blechdicke und unterer Blechdicke und wird in Nahtfaktorentabellen benötigt (siehe Tab. 6.1), die im Rahmen des Konstruktionssystems erdacht wurden. In dieser Arbeit wurden dazu die Höchstzugkräfte verschiedener Blechkombinationen ausgewertet. Hinsichtlich der Abhängigkeit der Höchstzugkraft vom Blechdickenverhältnis konnten Unterschiede für Scherzug- und Schälzugbeanspruchung festgestellt werden. Unter Scherzugbeanspruchung ist ein linearer Zusammenhang zwischen Höchstzugkraft und Blechdickenverhältnis erkennbar. Das stempel- und matrizenständige Blech scheinen somit gleichermaßen Einfluss auf die Festigkeit der Verbindung zu haben. Unter Schälzugbeanspruchung hat nur das stempelseitige Blech einen Einfluss auf die Zunahme der Höchstzugkraft (siehe Abschnitt 6.1.3).

Unter Scherzugbeanspruchung können Clinchverbindungen die höchsten Kräfte übertragen. Unter Schälzugbeanspruchung sind die Kräfte am niedrigsten. Das Verhalten für Clinchverbindungen im Übergangsbereich, zwischen Scher- und Schälzug ist bisher unbekannt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb der Schrägzug experimentell untersucht, der eine Beanspruchungsrichtung der Verbindung von 45° aufweist. Dazu wurden spezielle Probenhalter angefertigt und die Probengeometrie in Anlehnung an das DVS-Merkblatt 3480 entwickelt. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Höchstzugwerte unter Schrägzug mit der entwickelten Probengeometrie keine nennenswerte Abweichung von der Höchstzugkraft unter Scherzugbeanspruchung aufweisen.

Bei Untersuchungen der zufällig, außermittigen Anordnung der Clinchverbindungen für 4-Punkt Proben unter Scherzugbeanspruchung konnte keine relevante Abweichung zu den Norm-Proben mit mittigen Verbindungen festgestellt werden. Diese Aussage ist vor allem für praktische Anwendungen sinnvoll. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass Außermittigkeiten und diesbezügliche Toleranzen keinen Einfluss auf die Festigkeit der Verbindungen haben.

Um die Höchstzugkräfte aus den Zugversuchen in ertragbare Spannungen umzurechnen, wurden Grenznahtkurven für alle Versuchsreihen erstellt. Durch die Grenznahtkurve, der die normierte Grenznahtfunktion überlagert ist, ist einfach abzulesen, welche Spannung bei welchem Punktabstand von der Clinchverbindung übertragen werden kann. Diese zulässigen Spannungswerte sind direkt bezogen auf die Messwerte der Höchstzugkraft und daher ohne Sicherheitsbeiwerte nicht ohne weiteres praktisch anwendbar. Trotzdem bieten sie eine Grundlage für die spannungsbasierte Berechnung von Clinchverbindungen.

Eine weitere Hauptaufgabe der vorliegenden Arbeit bestand darin, eine geeignete beschreibende Funktion der Höchstzugkräfte für gleiche Punktzahlen im Festigkeitseigenschaftsfeld zu finden. Im Festigkeitseigenschaftsfeld sind die Höchstzugkräfte einer Versuchsreihe und Beanspruchungsrichtung in Abhängigkeit von der Gesamtprobenbreite dargestellt. Dadurch lässt sich beispielsweise der lineare Zusammenhang zwischen Punktzahl und Höchstzugkraft erkennen. Außerdem kann der Verlauf der Messpunkte gleicher Punktzahl für unterschiedliche Verbindungsabstände dargestellt werden. Um diesen Verlauf beschreiben zu können wurde eine Sättigungsfunktion ausgewählt. Zur Beschreibung des Verlaufes wurde die Tangens-Hyperbolicus-Funktion gewählt.

Ausgehend von den Ergebnissen soll noch ein kurzer Ausblick gegeben werden. Die Anwendbarkeit der Referenzfunktion beschränkt sich derzeit auf den Werkstoff DC04. Daher sollten Untersuchungen gemacht werden, ob sich diese auch für andere Werkstoffe anwenden lässt. Denkbar wäre die Verifizierung für Aluminiumwerkstoffe. Bei der Untersuchung von Aluminiumwerkstoffen bei gleicher Blechdicke und Fügeverfahren, könnte zudem der Einfluss der Materialfestigkeit auf die Höchstzugkraft untersucht werden. Fortführend wären auch Untersuchungen hinsichtlich eines Sicherheitsbeiwertes nötig, um die Anwendung der Referenzfunktion nutzen zu können.

Literaturverzeichnis

- [HSD-01] Hahn, O.; Schmid, L.; Dölle, N.: Clinchsimulation leicht gemacht, 2003; www.utfscience.de/pdf/28358_UT-03-02_003xx0302ut.pdf, 2009-08-26
- [WD-02] Wanner, M.-C.; Delin, M.: Bewertung der Tragverhaltenseigenschaften mechanisch gefügter Verbindungen, 2007; www.utfscience.de/pdf/67750_UT-07-04_001xx0407ut.pdf, 2009-08-18
- [TOX-03] <http://www.tox-de.com/de/produkte/verbindungstechnik.html>; 2009-06-26
- [MEN-04] Mende, T.: Clinchen von beschichteten Feinblechen unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes von Wirkmedien. Dissertation, 2006;
- [RIE-05] Riedel, F.: Möglichkeiten zur Optimierung von punktförmigen, form und Kraftschlüssigen Verbindungen; Dissertation, Shaker Verlag, 01/2004
- [MRL-06] Matthes, K.-J.; Riedel, F.; Lang, H.: Erarbeitung von Grundlagen für einen rechnerischen Festigkeitsnachweis von Clinchverbindungen, EFB-Forschungsbericht 237, 2005; ISBN: 978-3-86776-195-6
- [SLV-07] SLV-München; Ausbildungsangebote 2009 „mechanisches Fügen“; SLV-München, NL der GSI mbH, 2009 http://www.slv-muenchen.de/data/Ausbildungsangebot_mechanisches_Fuegen.pdf
- [S61-08] Neugebauer, R., Riedel, F.; Entwicklung eines Konstruktionssystems für Punktnähte auf der Basis von Spannungen; Fachbeitrag – Schweißen und Schneiden 61, 02/09
- [Norm-51] DIN8593-0; Fertigungsverfahren Fügen; 2003; Allgemeines; Beuth Verlag
- [Norm-52] DIN8593-5; Fertigungsverfahren Fügen; 2003; Fügen durch Umformen; Beuth Verlag
- [Norm-53] Merkblatt DVS/EFB 3420; Clinchen (Überblick); 08/2002
- [Norm-54] DIN 18800-1; Stahlbauten; 11/2008; Bemessung und Konstruktion; Beuth Verlag
- [Norm-55] Merkblatt DVS/EFB 3480; Prüfung von Verbindungseigenschaften; 06/2006

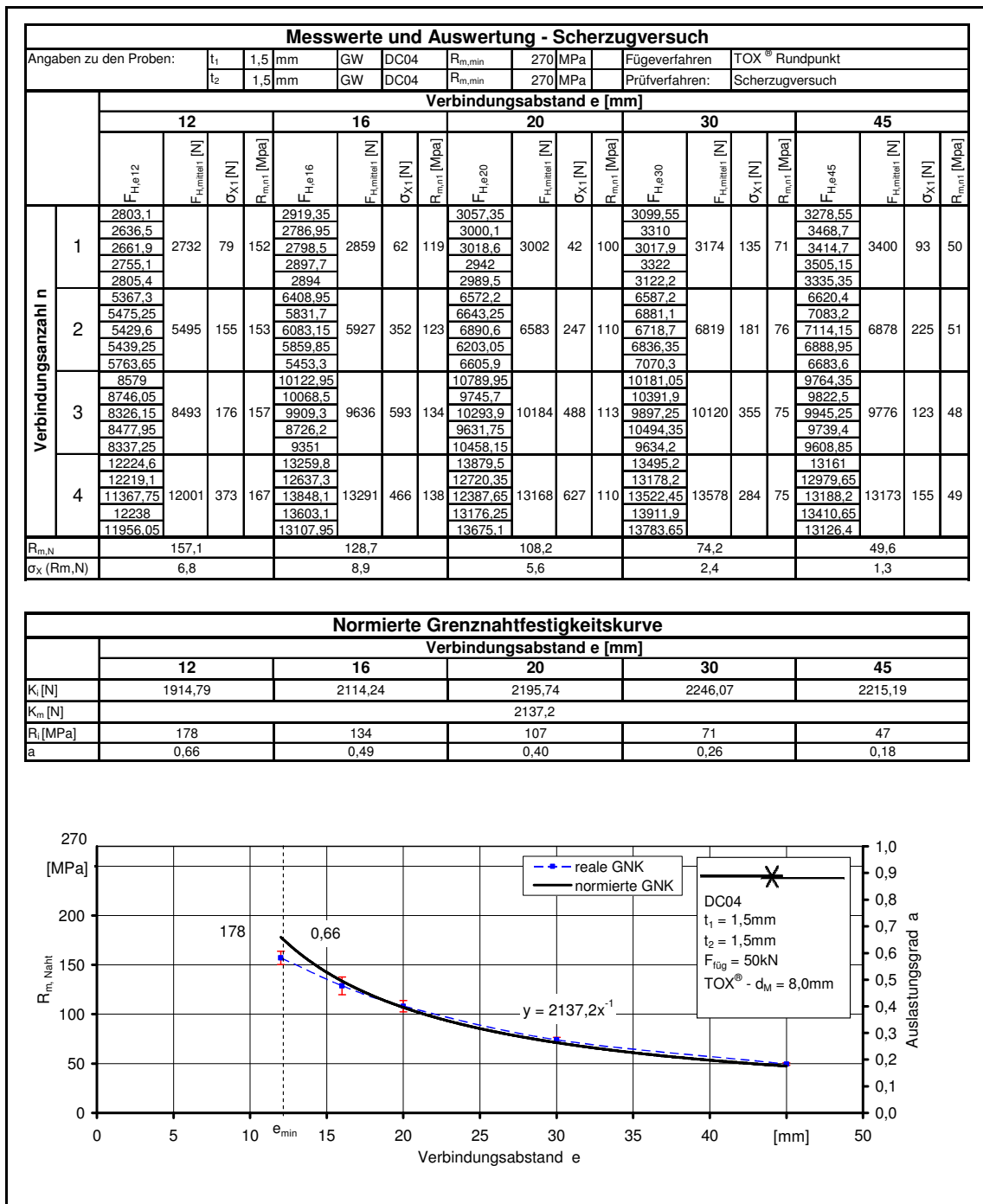
Weiterführende Literatur

- [BOB-09] Bober, J.; Beitrag zum Fügen von Stahlblechteilen durch örtliches einschneiden und Umformen; Dissertation 1987
- [BHP-10] Behrens, B.-A.; Hübner, S.; Prinzing, P.; Nahtclinchen als Alternative zum Falzen; Werkstattstechnik online; Jahrgang 94 (2004), H.10

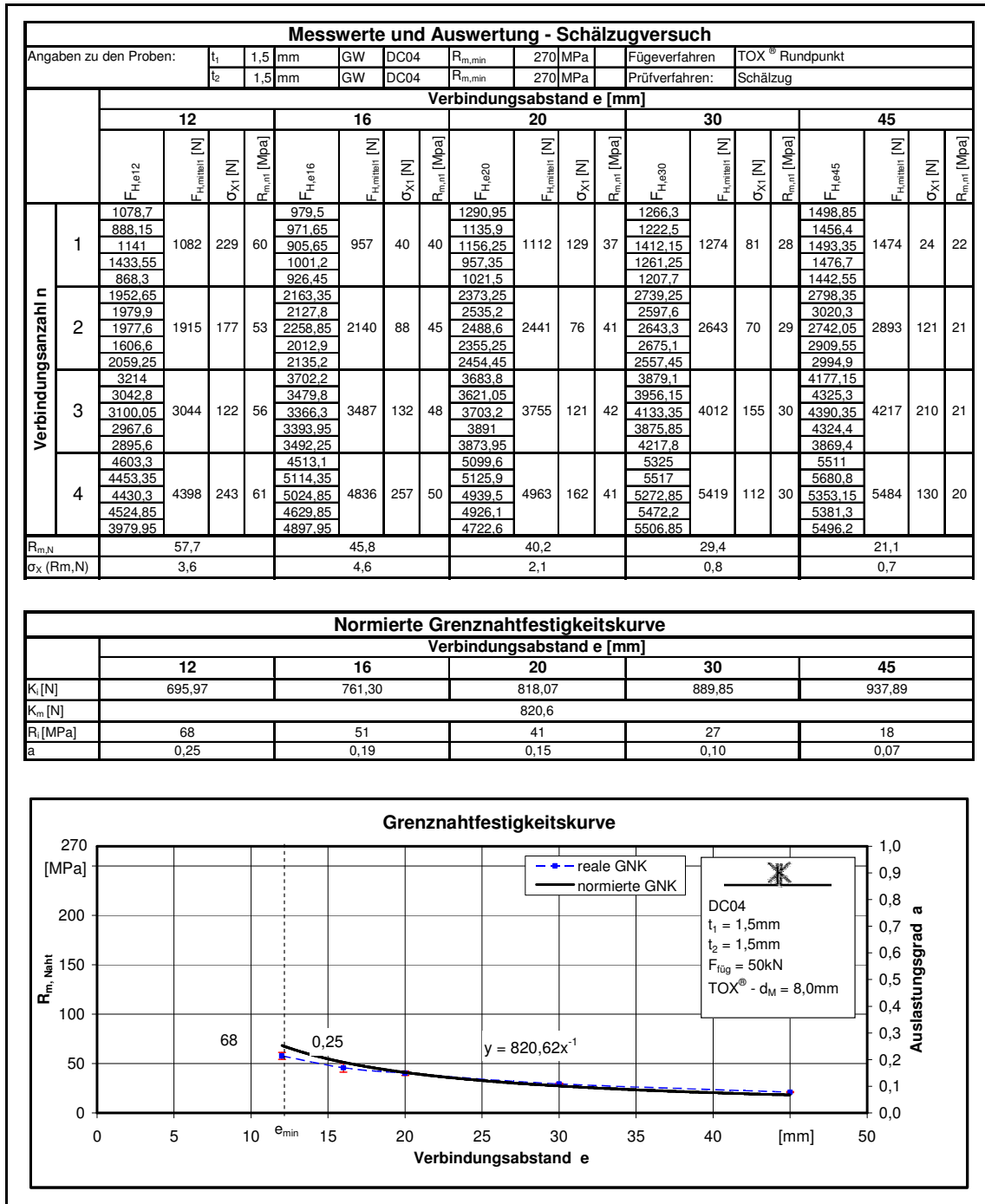
-
- [BHM-11] Behrens, B-A.; Hübner, S.; Milch, M.; Verringerung von Lackschädigungen beim Clinchen endlackierter Aluminiumbleche mittels keramischer Clinchwerkzeuge; 2004; www.UTFscience.de
- [WHB-12] Wanner, M.-C., Henkel, K-M.; Becker, B. etc; Clinchen von Stahl- und Aluminiumwerkstoffen unter Einwirkung von Leistungsschall; 2005; www.UTFscience.de
- [BH-13] Behrens, B-A.; Hübner, S.; Temperiertes Clinchen von Magnesiumblechen; 2005; www.UTFscience.de
- [HTV-14] Hahn, O.; Tan, Y.; Voigt, H-M.; Maschinelles Lernen zur Vorhersage der Tragfähigkeit von Clinchverbindungen; 2005; www.UTFscience.de

Anhang

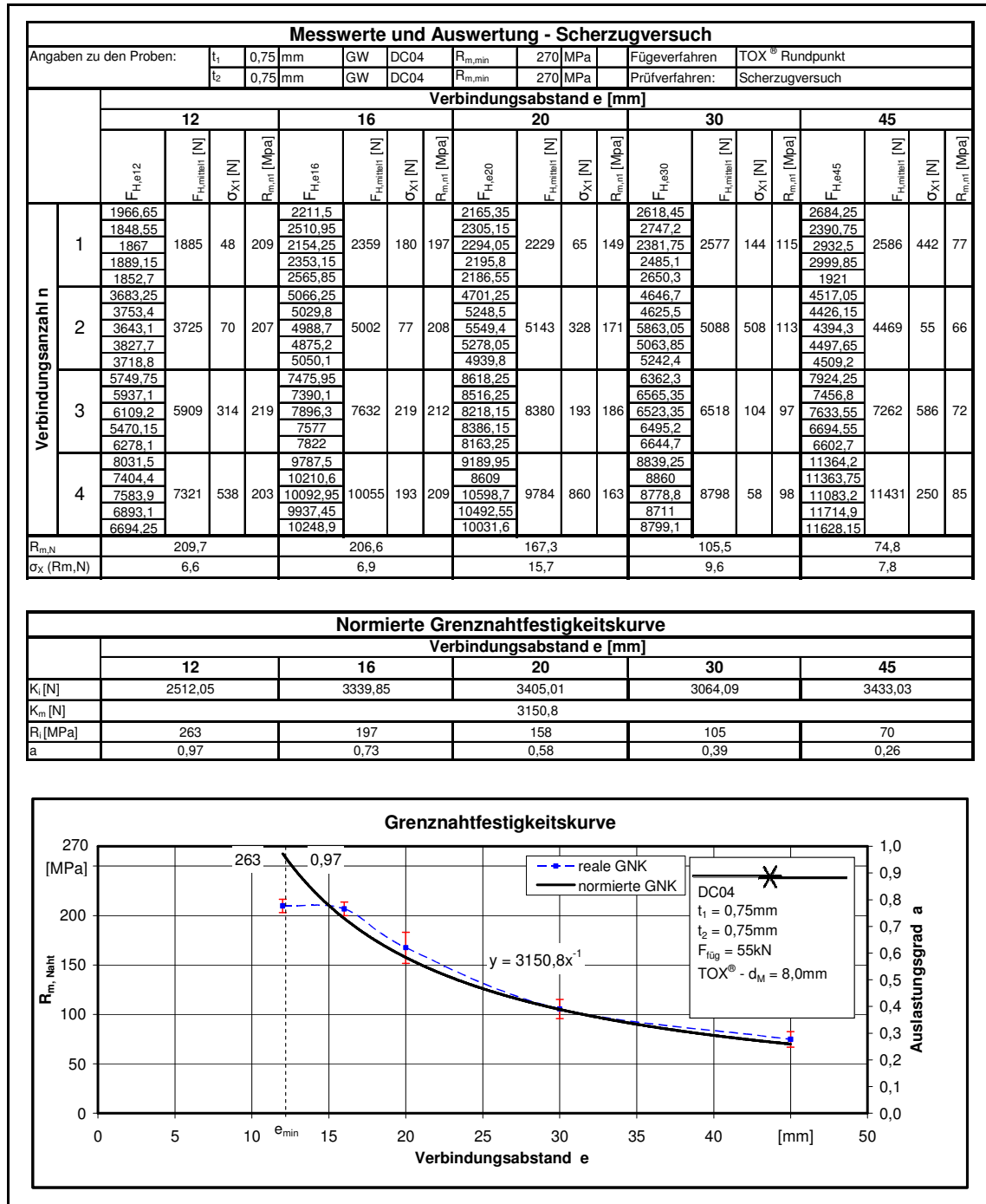
Anlage 1.1: Messwerte und Auswertung der Versuchsreihe 1,5/1,5 unter Scherzugbeanspruchung



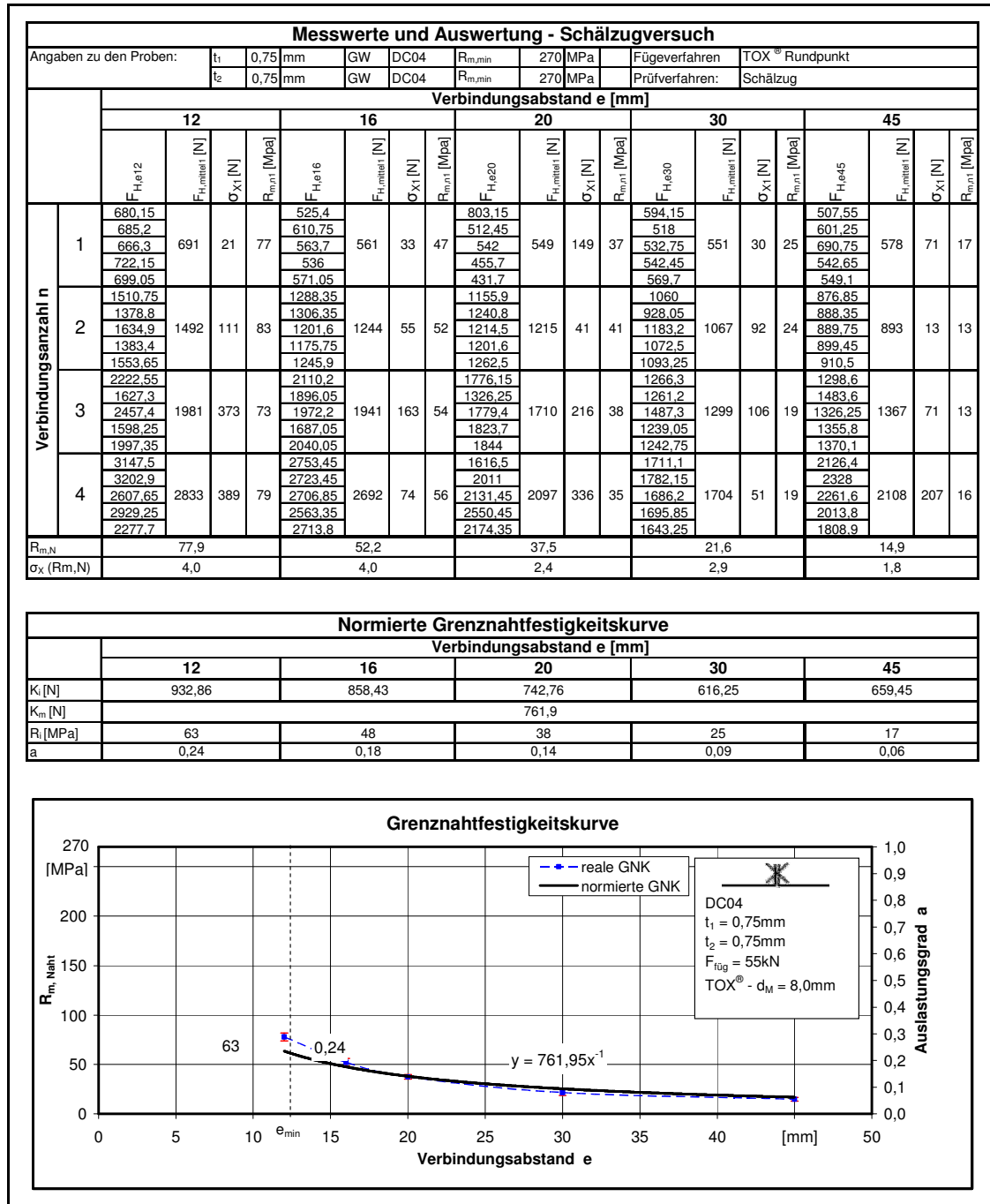
Anlage 1.2: Messwerte und Auswertung der Versuchsreihe 1,5/1,5 unter Schälzugbeanspruchung



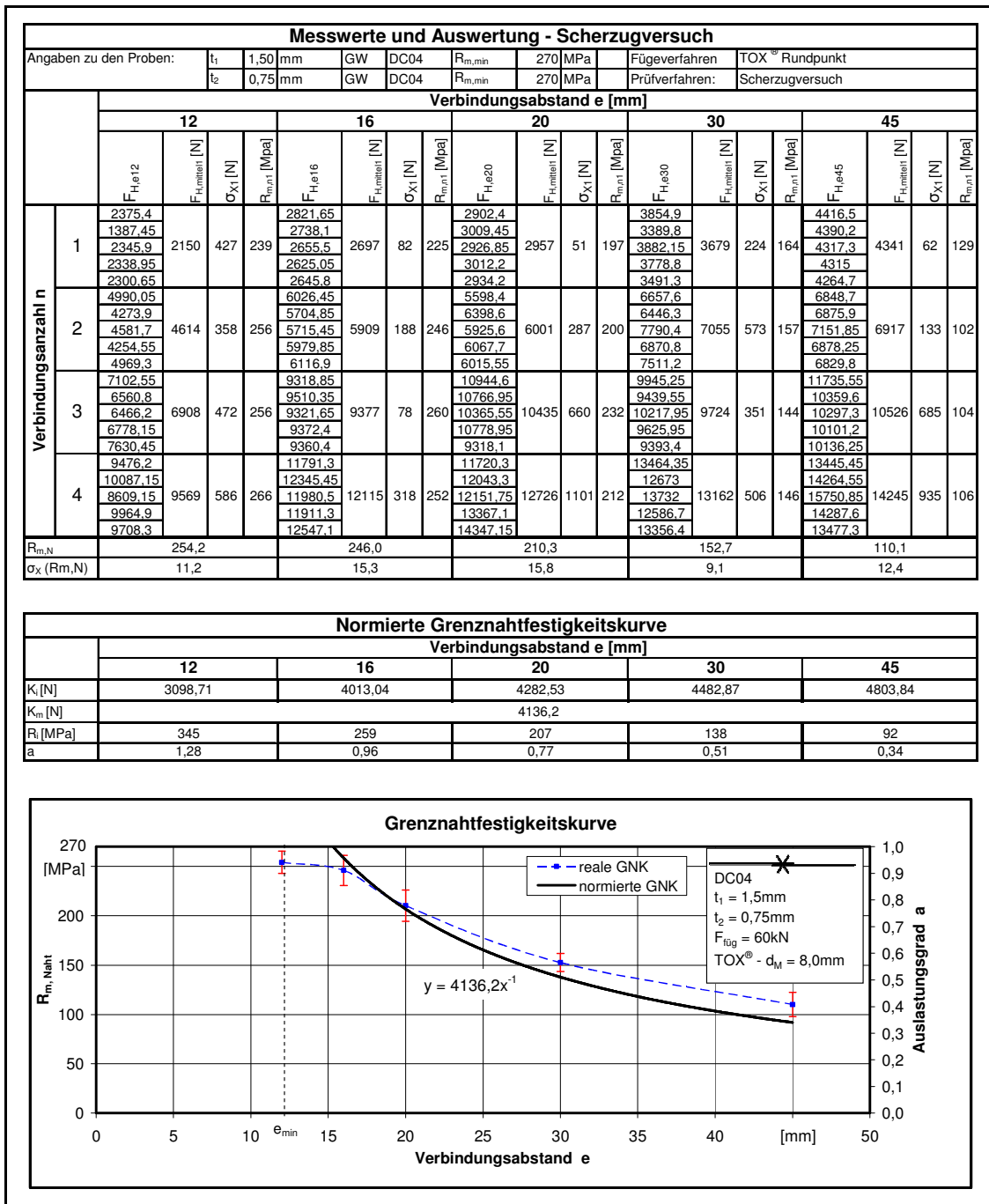
Anlage 2.1: Messwerte und Auswertung der Versuchsreihe 0,75/0,75 unter Scherzugbeanspruchung



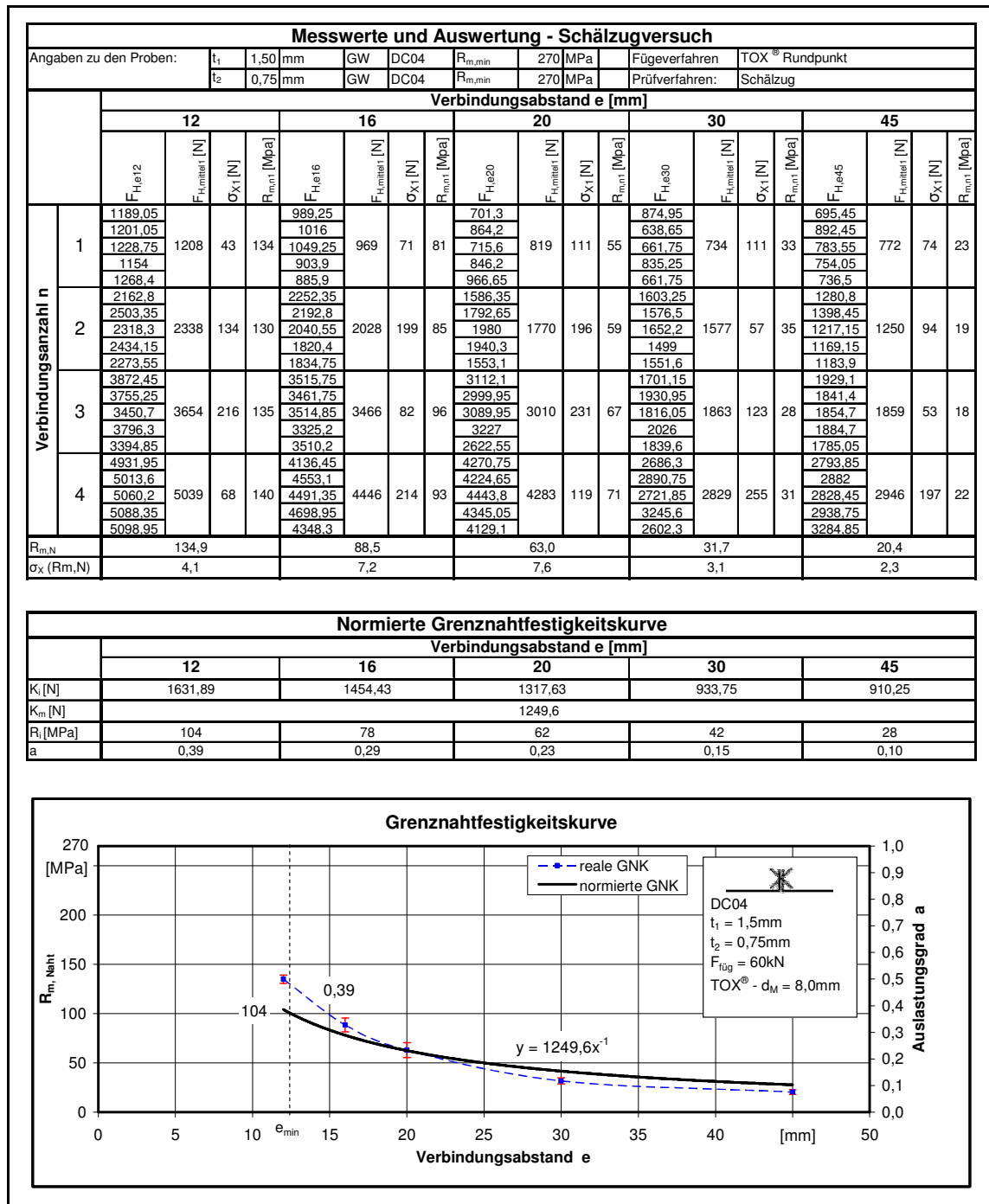
Anlage 2.2: Messwerte und Auswertung der Versuchsreihe 0,75/0,75 unter Schälzugbeanspruchung



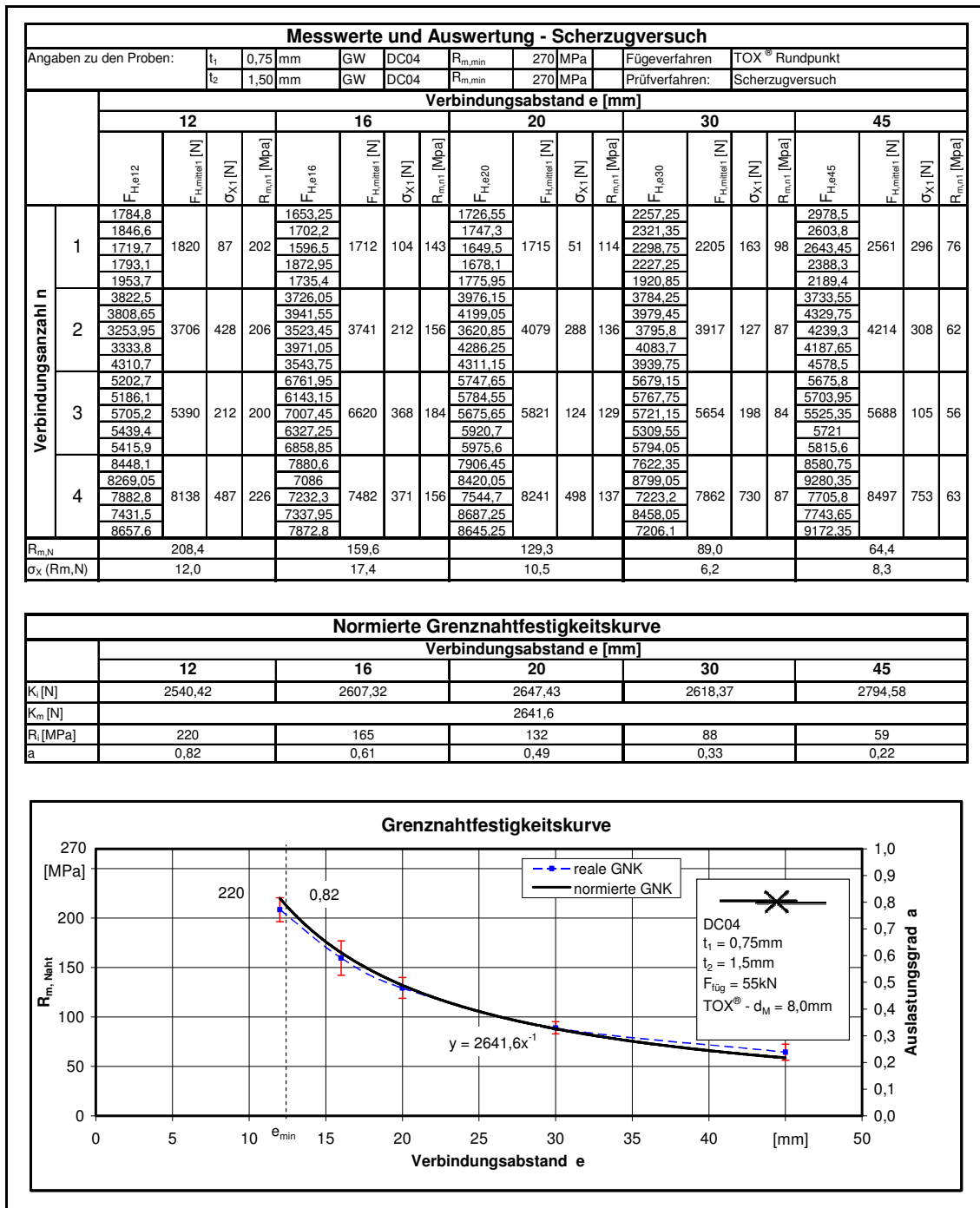
Anlage 3.1: Messwerte und Auswertung der Versuchsreihe 1,5/0,75 unter Scherzugbeanspruchung



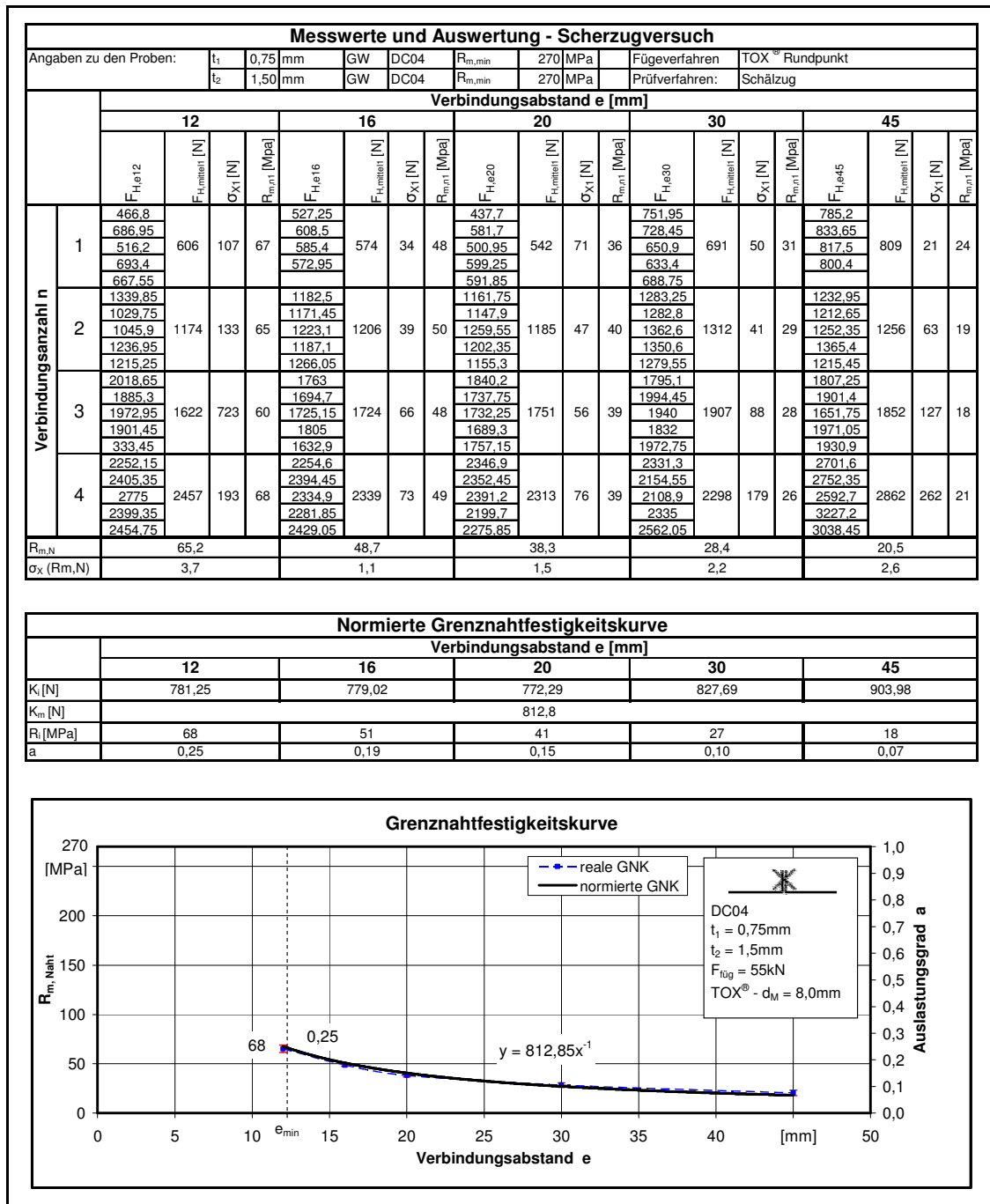
Anlage 3.2: Messwerte und Auswertung der Versuchsreihe 1,5/0,75 unter Schälzugbeanspruchung



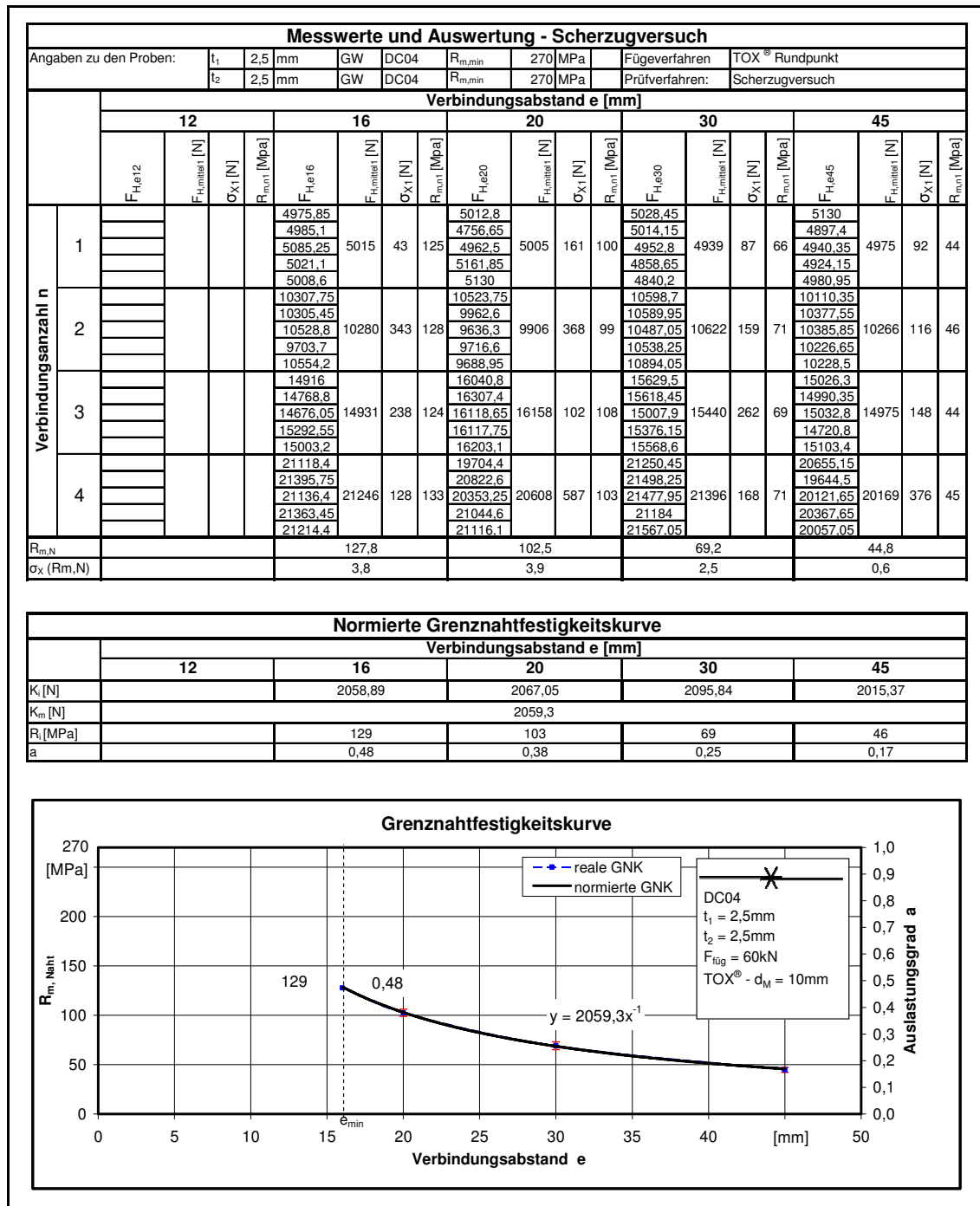
Anlage 4.1: Messwerte und Auswertung der Versuchsreihe 0,75/1,5 unter Scherzugbeanspruchung



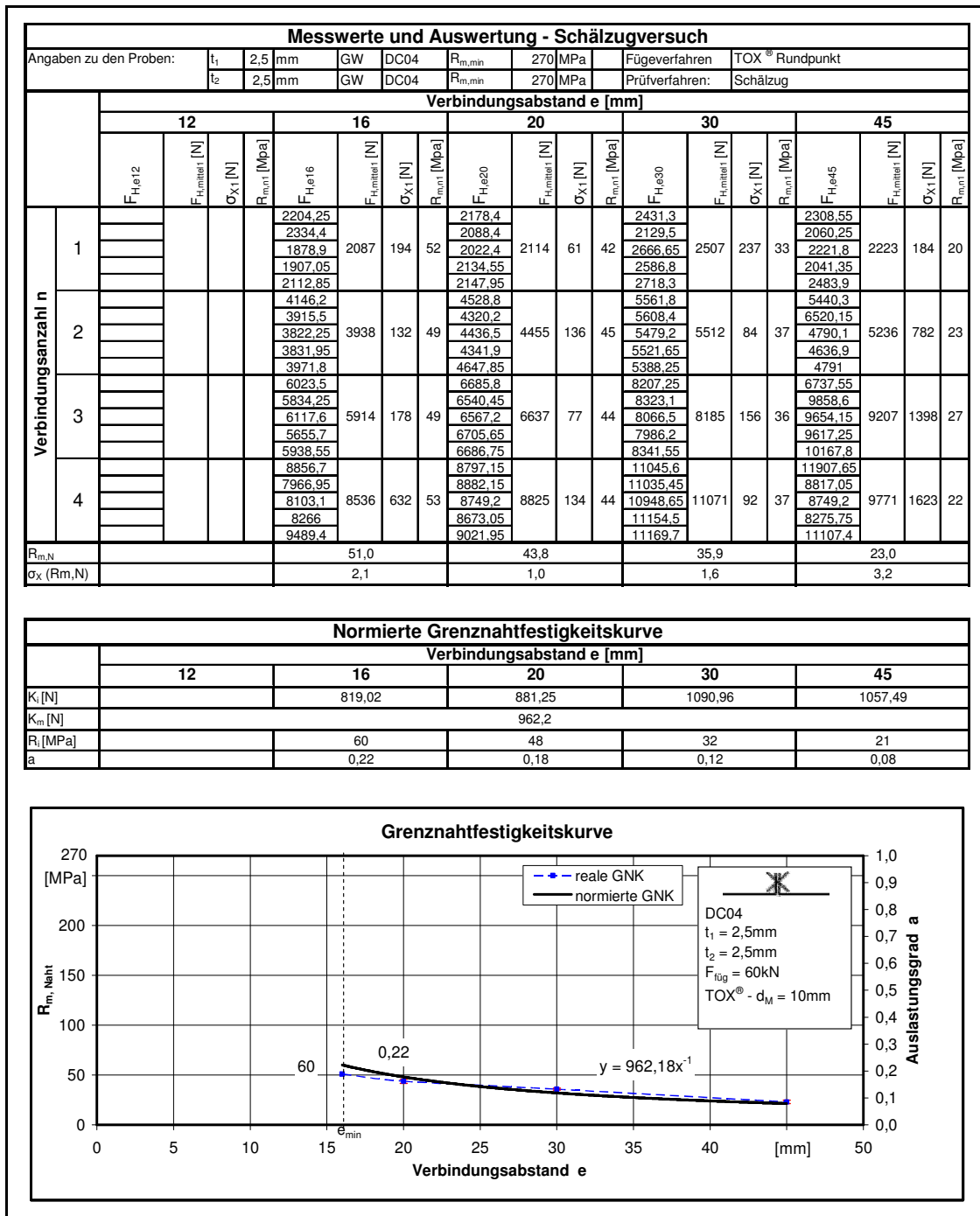
Anlage 4.2: Messwerte und Auswertung der Versuchsreihe 0,75/1,5 unter Schälzugbeanspruchung



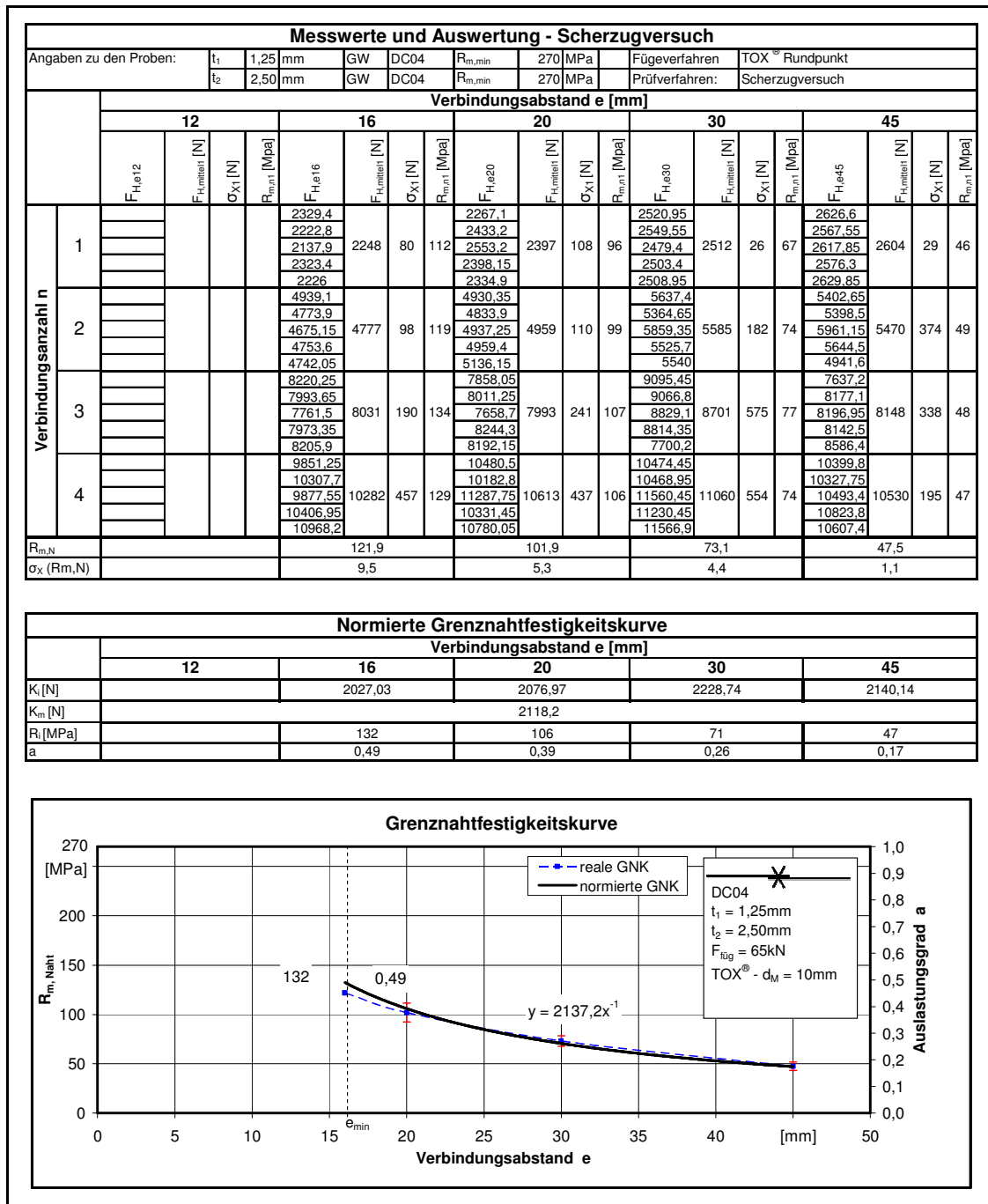
Anlage 5.1: Messwerte und Auswertung der Versuchsreihe 2,5/2,5 unter Scherzugbeanspruchung



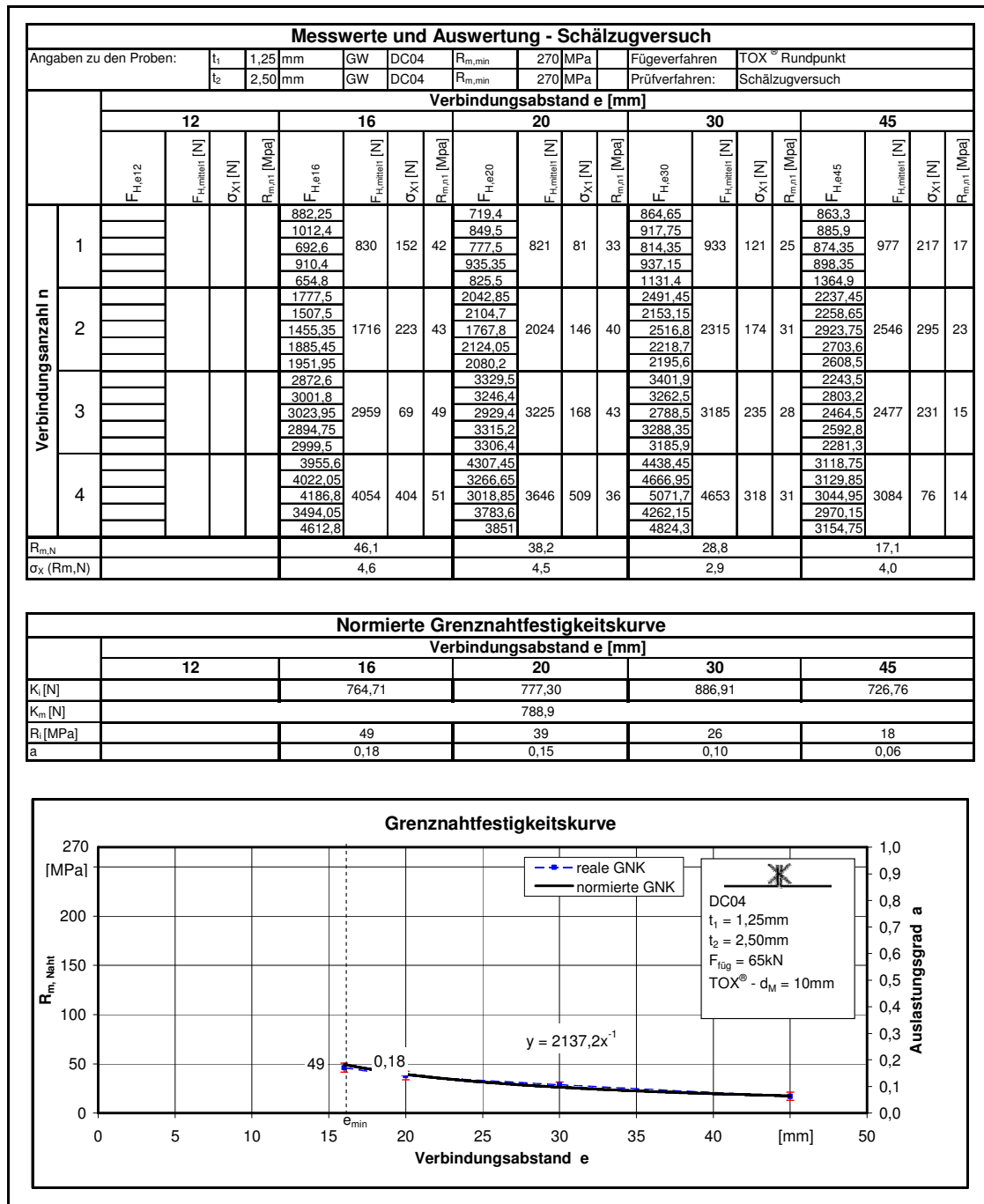
Anlage 5.2: Messwerte und Auswertung der Versuchsreihe 2,5/2,5 unter Schälzugbeanspruchung



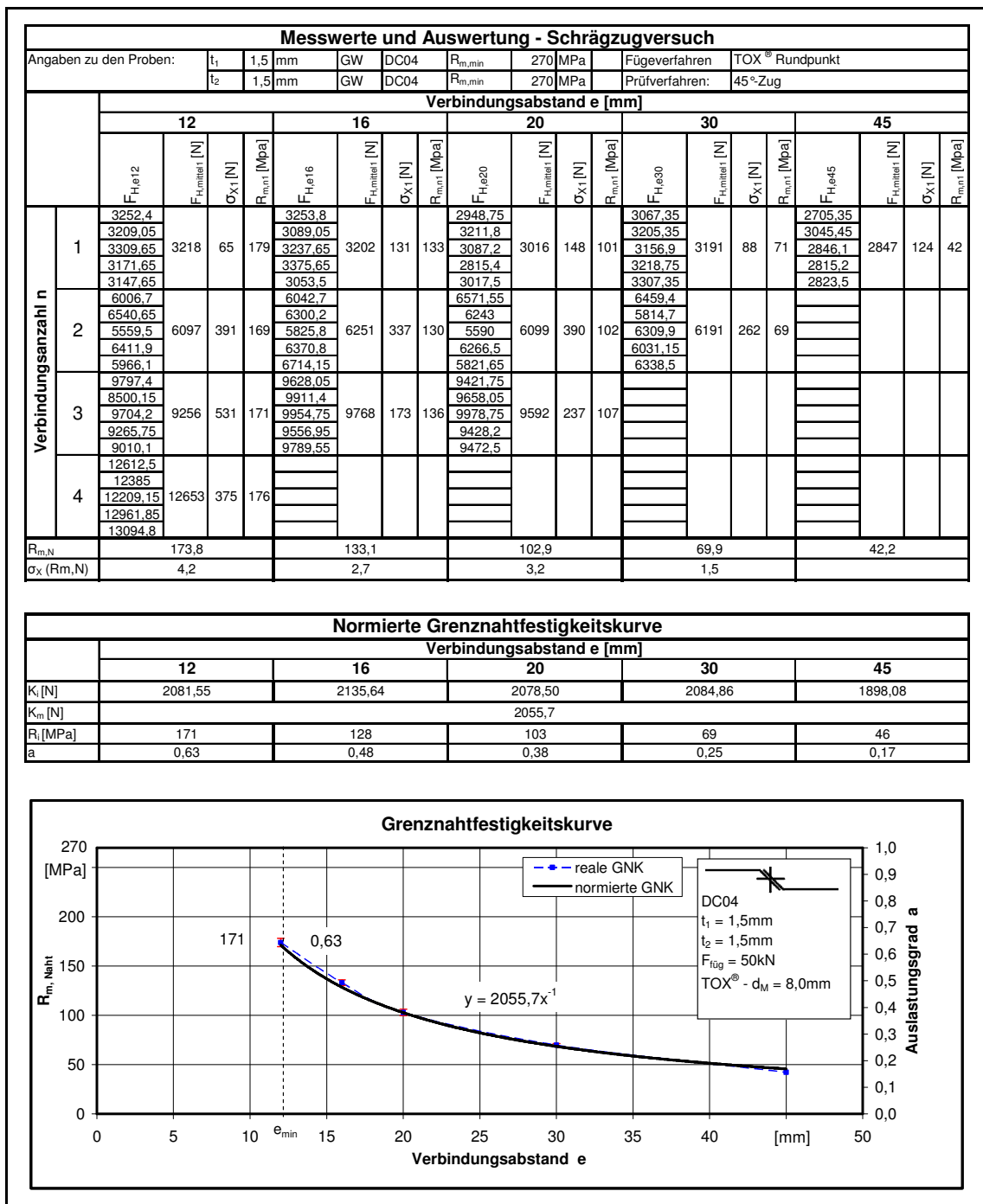
Anlage 6.1: Messwerte und Auswertung der Versuchsreihe 1,25/2,5 unter Scherzugbeanspruchung



Anlage 6.2: Messwerte und Auswertung der Versuchsreihe 1,25/2,5 unter Schälzugbeanspruchung



Anlage 7.1: Messwerte und Auswertung der Versuchsreihe 1,5/1,5 unter 45° Schrägzugbeanspruchung



Abschließende Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Diplomarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe, und dass ich alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen wie auch die sich an die Gedankengänge anderer Autoren eng anlegenden Ausführungen meiner Arbeit besonders gekennzeichnet und die Quellen aufgeführt habe.

Mittweida, den 04. Januar 2010

.....